

**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

№ 2 (026)
березень – квітень 2025

Дніпро 2025

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

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

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

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

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

Виходить 6 разів на рік.

Рекомендовано до друку вченою радою «Українського університету науки та технологій» протокол № 11 від 23.04.2025.

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 МОЇСЕСЕНКО
Редактор та коректор Валентина МАЛОВИК

**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

№ 2 (026)
March – April 2025

Dnipro 2025

EDITORIAL STAFF:

Chief Editor	Mykola SAVYTSKYI, Doctor of Engineering Science, PSACEA, Dnipro
Deputy Chief Editor	Vladyslav DANISHEVSKYI, Doctor of Engineering Science, PSACEA, Dnipro
Executive Secretary	Olena TYMOSHENKO, Candidate of Engineering Science, PSACEA, Dnipro
Executive Editor	Olena TYMOSHENKO, Candidate of Engineering Science, PSACEA, Dnipro

MEMBERS OF EDITORIAL STAFF:

A. S. Belikov, Doctor of Engineering Science, *Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (PSACEA)*, Dnipro. M. M. Biliaiev, Doctor of Engineering Science, *Ukrainian State University of Science and Technologies*, Dnipro. V. I. Bolshakov, Doctor of Engineering Science, PSACEA, Dnipro. V. Yev. Volkova, Doctor of Engineering Science, *Dnipro State Agrarian and Economic University*, Dnipro. V. M. Volchuk, Doctor of Engineering Science, PSACEA, Dnipro. S. I. Gubenko, Doctor of Engineering Science, PSACEA, Dnipro. V. M. Derevianko, Doctor of Engineering Science, PSACEA, Dnipro. Yu. O. Kirichek, Doctor of Engineering Science, PSACEA, Dnipro. T. S. Kravchunovska, Doctor of Engineering Science, PSACEA, Dnipro. Yu. I. Kryvoruchko, Doctor of Architecture, *National University "Lviv Polytechnic"*, Lviv. O. O. Lapshyn, Doctor of Engineering Science, *Kyryvi Rih National University*, Kyryvi 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, PSACEA, Dnipro. T. D. Nikiforova, Doctor of Engineering Science, PSACEA, Dnipro. V. I. Proskuriakov, Doctor of Architecture, *National University "Lviv Polytechnic"*, Lviv. V. L. Siedin, Doctor of Engineering Science, PSACEA, Dnipro. V. V. Tovbych, Doctor of Architecture, *Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture*, Kyiv. O. V. Kharlan, Candidate of Architecture, PSACEA, Dnipro. S. V. Shatov, Doctor of Engineering Science, 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 Korjajkins, 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. 11 from 23.04.2025
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> Valentyna MALOVYK

У ЦЬОМУ НОМЕРІ

Беліков А. С., Налисько М. М., Подкопаєв С. В., Шибя О. В., Журбенко В. М. ВИКОРИСТАННЯ ЗАХИСНИХ МОДУЛЬНИХ СПОРУД ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ.....	7
Беліков А. С., Пилипенко О. В., Руденко В. П. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ В УКРАЇНІ.....	18
Беліков А. С., Тодоров О. П., Крекнін К. А., Харченко В. В., Мещерякова І. В. ЩОДО ПИТАННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ З ОЦІНКИ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ.....	26
Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Семененко П. В. ПРОГНОЗУВАННЯ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ У ВЕНТИЛЬОВАНОМУ ОБ'ЄМІ ЗІ СКЛАДНОЮ ГЕОМЕТРІЄЮ.....	33
Єрмаков О. М., Волкова В. Є. ВПЛИВ МІНЕРАЛЬНИХ ОЛИВ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ СТИСНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	41
Качур В. І. ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ З ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ СТАЛІ НА СТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КЛИНКА НОЖА.....	48
Кулік М. В., Іваненко Д. С., Болук С. В., Чечель М. В., Гундров Г. В. ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ У БУДІВЕЛЬНУ ГАЛУЗЬ.....	58
Лабібов Р. Р., Ходанен Т. В. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙ ЛОКАЛІЗАЦІЇ В ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ПЛИННОСТІ.....	67
Ландо Є. О., Мурахтанова А. Л., Нетяга К. В. МЕХАНІЗМИ ОБЧИСЛЕННЯ КОМПЕНСАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ РИНКОВОЇ ВАРТОСТІ НЕРУХОМОГО МАЙНА.....	75
Лисенко Г. І., Волкова С. П., Ковба В. В., Бекіров В. ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНО-ПЕДАГОГІЧНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ ЗДОБУВАЧІВ МАГІСТЕРСЬКОГО РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ.....	83
Наумов В. О., Білоконь А. І. РОЗУМНИЙ ДЕМОНТАЖ: РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВИБОРУ СЦЕНАРІВ ДЕМОНТАЖУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ОБ'ЄКТІВ АНАЛОГІВ.....	95
Ольховик С. М., Соколов І. А. СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ.....	106
Пустовойтова О. М., Фірсов П. М., Камчатна С. М., Орел Є. Ф., Гвоздюк О. А. ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ЗОВНІШНЬОГО ПІДСИЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ДО ВПЛИВУ АГРЕСИВНИХ ФАКТОРІВ.....	112
Беліков А. С., Стрежекуров Ю. Е. РОЗРОБКА УСТАНОВКИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕНОСТІ ТЕПЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	120
Трегуб О. В., Ковальов В. В., Ландо Є. О., Кочан С. М., Андрєєва І. Г. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ В ПРОЦЕСІ СПОРУДЖЕННЯ НА СЛАБКИХ ҐРУНТАХ.....	126
Шехоркіна С. Є., Бордун М. В., Мерилова І. О., Лясота О. В., Федін В. А. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ПЕРЕХРЕСНО-КЛЕСНОЇ ДЕРЕВИНИ.....	140
Седін В. Л., Ульянов В. Ю., Ковба В. В., Загільський В. А., Бікус К. М., Горлач С. М. МОРФОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ БОЛОВО-АЛЮВІАЛЬНИХ ПІСКІВ МАЙДАНЧИКУ ЗАПОРІЗЬКОЇ АЕС.....	147

CONTENT

Bielikov A.S., Nalysko M.M., Podkopaev S.V., Shiba O.V., Zhurbenko V.M. PROTECTIVE MODULE BUILDINGS FOR PUBLIC SAFETY IN CONDITIONS OF MARTIAL LAW IN UKRAINE.....	7
Bielikov A.S., Pylypenko O.V., Rudenko V.P. GENERAL ISSUES OF RADIATION SAFETY IN UKRAINE.....	18
Bielikov A.S., Todorov O.P., Kreknin K.A., Harchenko V.V., Meshcheriakova I.V. REGARDING THE METHODOLOGY FOR ASSESSING THE FIRE HAZARD OF FIRE-RETARDANT COATINGS.....	26
Biliaiev M.M., Biliaieva V.V., Berlov O.V., Kozachyna V.A., Semenenko P.V. FORECASTING DUST AIR POLLUTION IN A VENTILATED VOLUME WITH COMPLEX GEOMETRY.....	33
Yermakov O.M., Volkova V.Ye. THE IMPACT OF MINERAL OILS ON THE LOAD-BEARING CAPACITY OF COMPRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS.....	41
Kachur V.I. INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION WITH HEAT TREATMENT OF STEEL ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A KNIFE BLADE.....	48
Kulik M.V., Ivanenko D.S., Bolyuk S.V., Chechel M. V., Hundrov H.V. CHALLENGES AND PROSPECTS OF IMPLEMENTING AUTOMATED SYSTEMS IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY.....	58
Labibov R.R., Khodanen T.V. NUMERICAL MODELLING OF PLASTICITY LOCALIZATION IN STRUCTURAL ELEMENTS DURING YIELDING.....	67
Lando Yev.O., Murakhtanova A.L., Netiaha K.V. MECHANISMS FOR CALCULATING COMPENSATION TAKING INTO ACCOUNT THE MARKET VALUE OF REAL ESTATE	75
Lysenko G., Volkova S., Kovba V.V., Bekirov V. THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF FORMATION OF PROFESSIONAL AND PEDAGOGICAL COMPETENCE OF MASTER'S LEVEL HIGHER EDUCATION GRADUATES IN TECHNICAL SPECIALTIES.....	83
Naumov V.O., Bilokon A.I. SMART DISMANTLING: DEVELOPING SOFTWARE FOR OPTIMAL SELECTION OF DISMANTLING SCENARIOS BASED ON ANALYSIS OF ANALOGOUS OBJECTS.....	95
Olkhovyyk S.M., Sokolov I.A. MODERN APPROACHES TO EVALUATING THE EFFICIENCY OF RESIDENTIAL BUILDING RECONSTRUCTION.....	106
Pustovoitova O.M., Firsov P.M., Kamchatna S.M., Orel Yev.F., Gvozduk O.A. RESEARCH OF THE RESISTANCE OF COMPOSITE MATERIAL FOR EXTERNAL ENHANCEMENT OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES TO THE INFLUENCE OF AGGRESSIVE FACTORS.....	112
Bielikov A.S., Strezhekurov Yu.E. DEVELOPMENT OF THE INSTALLATION OF PHYSICAL MODELING OF SPREAD OF HEAT RADIATION AND CONDUCTING RESEARCH.....	120
Tregub O.V., Kovalov V.V., Lando Yev.O., Kochan S.M., Andreieva I.G. NUMERICAL MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE ROAD EMBANKMENT DURING CONSTRUCTION ON SOFT SOILS.....	126
Shekhorkina S.Yev., Bordun M.V., Merylova I.O., Lyasota O.V., Fedin V.A. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE STRENGTH OF CROSS-LAMINATED TIMBER.....	140
Sedin V.L., Ulyanov V.Yu., Kovba V.V., Zahilskyi V.A., Bikus K.M., Gorlach S.M. SOME MORPHOLOGICAL FEATURES OF THE EOLIAN-ALLUVIAL SANDS OF THE INDUSTRIAL SITE AT THE ZAPORIZHZHIA NPP.....	147

УДК 351.864:006.063

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.07.1138

ВИКОРИСТАННЯ ЗАХИСНИХ МОДУЛЬНИХ СПОРУД ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
НАЛИСЬКО М. М.², *докт. техн. наук, проф.*,
ПОДКОПАЄВ С. В.³, *докт. техн. наук, проф.*,
ШИБА О. В.⁴, *суд. експ.*,
ЖУРБЕНКО В. М.^{5*}, *асп.*

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

² Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: nnikolay@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

³ Донецький національний технічний університет, вул. Потебні, 56, 43003, Луцьк, Україна, тел. +38 (066) 052-95-77, e-mail: serhii.podkopaiev@donntu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3258-9601

⁴ Дніпропетровський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр Міністерства внутрішніх справ України, тупик Будівельний, 1, 49033, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 732-16-93, e-mail: lesiya_shiba@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4269-8887

^{5*} 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, e-mail: zurbenko.valeriia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9607-8205

Анотація. Постановка проблеми. Воєнні дії в Україні призвели до значних матеріальних та людських втрат. Статистика свідчить, що країна на початку широкомасштабних військових дій не була готова до захисту населення від безпосередніх наслідків. Проведений аналіз матеріально-технічної бази сховищ, які розташовані на території міст та населених пунктів, показав їх незадовільний стан та невідповідність місць їхнього розташування вимогам до термінів здійснення евакуації. В зв'язку з вказаними обставинами на основі прийнятих рішень була визначена необхідність будівництва та розміщення на території населених пунктів мобільних укриттів, призначених для захисту населення в умовах міської забудови від враження зброєю ураження, уламками від вибухів артилерійських боєприпасів та авіаційних бомб, та наслідків розрушення будівель і споруд. **Мета статті:** дослідження на основі досвіду зведення та експлуатації в Україні швидко споруджувальних захисних споруд цивільного захисту модульного типу (ШСЗСЦЗ), та визначення основних критеріїв та вимог щодо їх спорудження та розміщення. **Висновок.** На основі проведеного аналізу швидко споруджувальних захисних споруд ШСЗСЦЗ, які, згідно ДБН В.2.2-5 протягом нормативного часу згідно ДБН В.1.2-4, повинні забезпечувати захист населення від засобів ураження, складений список основних порушень при зведенні, який веде до зниження експлуатаційних якостей і підвищення небезпеки населення. Визначені основні критерії виготовлення та розміщення на території населених пунктів модульних захисних споруд.

Ключові слова: захисна модульна споруда; захисне укриття; укриття

PROTECTIVE MODULE BUILDINGS FOR PUBLIC SAFETY IN CONDITIONS OF MARTIAL LAW IN UKRAINE

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
NALYSKO M.M.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
PODKOPAIEV S.V.³, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
SHIBA O.V.⁴, *Forensic expert.*,
ZHURBENKO V.M.^{5*}, *Postgrad. Stud.*

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

² Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: nnikolay@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4039-1571

³ Donetsk National Technical University, 56, Potebni St., Luts, 43003, Ukraine, e-mail: serhii.podkopaiev@donntu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3258-9601

⁴ Dnipropetrovsk Forensic Research Center of Ministry Internal Affairs of Ukraine, 1, Tupik Budivelniiy, Dnipro, 49033, Ukraine, tel. +38 (056) 732-16-93, e-mail: lesiya_shiba@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4546-1383

^{5*} Department of Labor Protection, 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) 362-40-52, e-mail: zurbenko.valeriia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9607-8205

Abstract. Problem statement. Military actions in Ukraine led to significant material and human losses. Statistics show that at the beginning of large-scale military operations, the country was not ready to protect the population from the immediate consequences. Instrumental and technical base analysis of storage facilities which are located on the territory of cities and settlements showed their unsatisfactory condition and the non-compliance of their locations with the requirements for the terms of evacuation. In connection with the specified circumstances, on the basis of the decisions made, it was determined the need for the construction and placement of mobile shelters on the territory of populated areas, designed to protect the population in the conditions of urban development from impact by weapons of mass destruction, debris from explosions of artillery ammunition and aerial bombs, and limiting the destruction of buildings and buildings. **The purpose of article:** to research the experience of construction and operation in Ukraine quickly erected protective structures of modular type civil protection (SHSZSCZ), the main criteria and requirements for their construction and placement. **Conclusion.** On the basis of the analysis of quickly constructed protective structures of SHSZSCZ, which, according to DBN B.2.2-5, within the normative time according to DBN B.1.2-4, must ensure the protection of the population from means of damage, the most common violations, a compiled list of the main violations during construction, which leads to a decrease in operational qualities and an increase in the danger of the population. The main criteria for the manufacture and placement of modular protective structures on the territory of settlements have been determined.

Keywords: protective module building; emergency shelter; shelter

Постановка проблеми. Від початку повномасштабних воєних дій станом на 24 лютого 2023 року, за даними Дніпропетровської обласної військової адміністрації, по Дніпропетровщині було випущено понад 330 ракет та кілька тисяч реактивних снарядів. Через атаки загинули 218 мирних жителів і понад 800 дістали поранення. За цей час Дніпропетровська обласна прокуратура відкрила понад тисячу кримінальних проваджень за фактом порушення законів та звичаїв війни [8].

Статистика свідчить, що наша країна не була готова до такого вторгнення, та люди які проживають на території України, не мають захисту від агресивних атак сусідньої держави, тому має важливе значення правильне влаштування захисних споруд цивільного захисту регулюється будівельними нормами та правилами, Правилами пожежної безпеки, ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту», ДСТУ 9195:2022 «Швидкоспоруджувані захисні споруди

цивільного захисту модульного типу», Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів та іншими законодавчими та нормативно-правовими актами, технічними умовами.

Зараз в деяких містах України можна побачити на зупинках громадського транспорту, скверах та парках суцільні залізобетонні конструкції з позначкою «Захисне укриття» або «Укриття» (рис. 1).

Мета статті. В зв'язку з вказаними обставинами на основі прийнятих рішень була визначена необхідність будівництва та розміщення на території населених пунктів мобільних укриттів, призначених для захисту населення в умовах міської забудови від враження зброєю ураження, уламками від вибухів артилерійських боєприпасів та авіаційних бомб, та обмеження розрушення будівель і споруд. Важливим є питання: чи відповідають визначені захисні споруди цивільного захисту вимогам законодавчих та нормативно-правовим актам.



Рис. 1. Суцільна залізобетонна конструкція під назвою «Укриття»

Зараз в Україні залізобетонні укриття виготовляють:

- ТОВ «Завод залізобетонних виробів «Дорожні та енергетичні конструкції» – 169 млн грн. Це приблизно п'ята частина всіх замовлень. Фірма постачала укриття практично в усіх регіонах, де їх замовляли.

- ТОВ «Балівський завод залізобетонних конструкцій», який уклав контрактів майже на 86 млн грн. Фірма постачала модульні укриття в Дніпропетровську (43 млн грн), Донецьку (19 млн грн), Полтавську (7 млн грн).

- ТОВ «АКАМ» – 67 млн грн.

- ТОВ «Хоббіт хаус» – 56 млн. грн. Підприємство працювало здебільшого на заході, півдні та в центрі України.

- ТОВ «Сучасні Бетонні Рішення», яке уклало контрактів на 51,2 млн грн.

Порівнювати вартість укриттів дуже важко, бо в кожного виробника свої характеристики і комплектація сховищ, різні умови їхнього виготовлення та перевірки, а в кожній закупівлі – свої умови доставки.

Враховуючи те, що в виробництві «укриттів» не визначені чітко вимоги до їх виготовлення, виробники роблять їх на свій розсуд та згідно з технічними характеристиками, який визначає замовник.

Відгуків про те, наскільки ефективний такий спосіб захисту в Україні, і наскільки широко люди його використовують, наразі дуже небагато. Не факт, що такі показники наразі відстежують і фіксують. Особливо в прифронтових населених пунктах, які обстрілюють щодня, але таких даних в Україні відсутні.

Як і всі інші місця захисту, мобільні укриття потрібно утримувати, щоб ними можна було користуватися. Так, у Тернополі місцева влада вже почала стикатися з проблемами, коли споруди намагаються використати для розпиття спиртних напоїв чи в якості вбиральні. Схожа ситуація виникала також щонайменше в Нікополі та Дніпрі.

Модульні укриття можуть стати рішенням для ситуацій, коли поруч немає підходящого приміщення під сховище, або воно потрібно дуже близько до місця скупчення людей. Але поки їх встановлення подекуди нагадує вираз «хто в ліс, хто по дрова». Не вистачає чіткого регулювання та рекомендацій, до їх розміщення [1].

Чи вважаються такі споруди укриттями?

Відповідно до ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту» є наступні визначення:

Захисні споруди, в залежності від умов, що в них створюються, та захисних властивостей поділяються на: сховища та протирадіаційні укриття (далі – ПРУ) [3].

З метою раціонального використання захисних споруд поза межами періоду дії надзвичайних ситуацій, воєнних (бойових) дій та терористичних актів в житлових будінках та будівлях громадського призначення, у тому числі закладах освіти та закладах охорони здоров'я рекомендується проектувати СПП, які: призначені для використання за основним функціональним призначенням з метою забезпечення суспільних або господарських потреб (основне функціональне призначення); мають захисні властивості

сховищ або ПРУ та спроектовані, побудовані або пристосовані таким чином, щоб забезпечити умови для тимчасового перебування людей, що підлягають укриттю, під час дії надзвичайної ситуації, воєнних (бойових) дій та терористичних актів. СПП мають одночасно задовольняти вимоги, встановлені будівельними нормами відповідно до обох функціональних призначень таких споруд.

У разі поділу об'єкта будівництва на черги або пускові комплекси, черга або пусковий комплекс, яка вводиться в експлуатацію першою відповідно до проектною документації, у своєму складі повинна включати будівництво захисних споруд або СПП, місткість яких відповідає потребам даної черги (пускового комплексу) або об'єкта будівництва в цілому. Кожна наступна черга (пусковий комплекс) має бути забезпечені захисними спорудами або СПП у своєму складі або у складі попередніх черг (пускових комплексів), які введені в експлуатацію.

Захисні властивості сховищ передбачають виключення або зменшення впливу таких прогнозованих небезпечних чинників (факторів): дії повітряної ударної хвилі від побічної дії зброї масового ураження з розрахунковим надмірним тиском; дії повітряної ударної хвилі при застосуванні звичайних засобів ураження; проникнення уламками засобів звичайного ураження; дії небезпечних хімічних речовин, радіоактивних речовин бойових отруйних речовин, небезпечних біологічних речовин та бактеріальних засобів ураження; дії проникаючої радіації та іонізуючого випромінювання від радіоактивно забруднення місцевості, води та повітря, шляхом забезпеченням нормативного ступеня послаблення радіаційного впливу (ступеня захисту); катастрофічного затоплення (для сховищ, що розташовуються у зонах можливого катастрофічного затоплення); дії високих температур та продуктів горіння при пожежах.

Перелік та необхідні мінімальні розрахункові параметри захисних

властивостей сховищ та СПП із захисними властивостями сховищ визначаються залежно від їх класу, що обирається відповідно до додатку А (табл. А. 1) – залежно від місцезнаходження об'єкта будівництва.

Згідно п. п. 5.5., 5.6, 5.7, 5.8., 7.1, 7.2., 7.4 ДСТУ 9195:2022.

Швидкостпоруджувані захисні споруди цивільного захисту (ШСЗСЦЗ) модульного типу повинні забезпечувати захист населення, що підлягає укриттю, від розрахункової дії засобів ураження згідно з ДБН В.2.2-5 [1] протягом нормативного часу, який встановлено згідно з ДБН В.1.2-4 [2].

Швидкостпоруджувані сховища (ШСС) модульного типу повинні забезпечувати захист від: – дії надмірного тиску у фронті повітряної ударної хвилі, не менше ніж $\Delta P_{\phi} = 100$ кПа; – місцевої та загальної дії звичайних засобів ураження (стрілецької зброї, уламків ручних гранат, артилерійських боєприпасів та авіаційних бомб); – дії отруйних речовин, радіоактивних речовин і бактеріальних засобів; – дії проникаючої радіації, зі ступенем послаблення 1 000 ($K_z = 1\ 000$); – теплового впливу під час виникнення пожеж.

Зовнішні огорожувальні конструкції швидкостпоруджуваних протирадіаційних укриттів (далі – ШСПРУ) модульного типу повинні забезпечувати захист населення від: – місцевої та загальної дії звичайних засобів ураження (стрілецької зброї, уламків ручних гранат, артилерійських боєприпасів та авіаційних бомб); – дії зовнішнього іонізуючого випромінювання й надмірного тиску фронту повітряної ударної хвилі залежно від зони, де ШСЗСЦЗ модульного типу планують розташувати (встановити), а саме: – у зоні можливих незначних (слабких) руйнувань ($\Delta P_{\phi} = 20$ кПа) та мати коефіцієнт захисту $K_z = 200$.

Несучі та огорожувальні конструкції ШСЗСЦЗ модульного типу, їх окремі конструкції (блок-модулі) потрібно проектувати й виготовляти з матеріалів, які забезпечують дотримання нормативних

вимог щодо міцності, надійності та безпечної експлуатації змонтованої (завершеної будівництвом) ШСЗСЦЗ [2].

Таким чином проаналізувавши законодавчі та нормативні акти, які зараз діють на території України, можна стверджувати, що ці захисні конструкції не є укриттям, це просто конструкція для якої потрібно виконати цілу низку заходів, щоб вона стала укриттям.

Згідно ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту», захисні споруди цивільного захисту та споруди подвійного призначення повинні проектуватися та будуватися таким чином, щоб люди в цих захисних спорудах могли знаходитись протягом двох суток тобто протягом 48 годин безперервного знаходження в них. Так як, повітряна тривога на території деяких населених пунктах може тривати по 6–12 годин, ці суцільні залізобетонні конструкції не відповідають зазначеним вимогам та знаходження в них протягом тривалого часу просто неможливо, тому що:

1. Для безпечного знаходження в захисній споруді цивільного захисту, ця модульна захисна конструкція повинна бути заглиблена під землю або частково заглиблена, а якщо це неможливо зробити (з точки зору геологічних, гідрогеологічних та інших умов) перш ніж розташовувати захисну споруду цивільного захисту вище планувальної позначки землі для досягнення її захисних властивостей потрібно:

- обвалити цю захисну споруду цивільного захисту ґрунтом;
- влаштувати захисні екрани.

Для додаткового підвищення захисних властивостей допускається використання:

- додаткового обкладення бетонними (залізобетонними) будівельними конструкціями (виробами);
- встановлення габіонів, наповнених сипучими матеріалами;
- обкладання таких споруд мішками з сипучими матеріалами, за умов забезпечення їх надійної фіксації та цілісності.

2. Потрібно впевнитись в тому чи

відповідають властивості суцільної залізобетонної конструкції вимогам ДБН, ДСТУ, ТУ санітарним нормам і правилам та ін. Так як виробники цих конструкцій іноді використовують дешевші матеріали (марка бетону може не відповідати вимогам ДБН для захисної споруди цивільного захисту; використані герметики між стиками цих модулів не відповідають своїм захисним властивостям; дверні отвори та двері теж можуть не відповідати захисним властивостям; проведені електричні дроти із дешевого матеріалу та інше).

Так виходячи з вищевикладеного у цьому пункті знайшло підтвердження використання заводами виробниками дешевих матеріалів та герметиків, а саме: під час дослідження даних конструкцій «Укриттів», які зараз знаходяться на зупинках встановлено: після опадів снігу, дощів в цих укриттях накопичується вода, внаслідок чого на стінах з'являється пліснява, що зменшує властивості даної конструкції та несе негативний вплив на самопочуття людини. Потрапляючи в дихальну систему пліснява сприймається як стороннє тіло та викликає алергічні реакції, також в організм надходить доза мікро токсинів, які посилюють запалення та погіршують загальне самопочуття людини.

Також волога та сирість в даній конструкції може привести до зношення електричних провідників, що може призвести до нещасного випадку, а саме удару електричним струмом.

Також в деяких випадках було встановлено, що марка бетону не відповідає вимогам ДБН для споруд цивільного призначення.

3. Так як для довготривалого (48 годин) знаходження людей в захисній споруді цивільного захисту в ній потрібно влаштовувати мінімальні санітарно-побутові приміщення, з розрахунком кількості перебування в зазначеній споруді людей, а саме: вбиральні, медичний пункт (або пункт надання до медичної допомоги), пункт прийому їжі, пункт відпочинку та ін. Крім цього потрібно влаштовувати місця для сидіння та ін.

4. Дані споруди повинні бути оснащені опаленням, електромережою водопроводом, каналізацією та вентиляцією відповідно до вимог ДБН.

5. Дані споруди повинні бути оснащені: запасом води з розрахунком кількості людей, які будуть знаходитись в даній захисній споруді цивільного захисту; протипожежними засобами захисту; ліками та інш.

6. Знаходження даної споруди вище планувальної позначки землі, розташовується в 100 метрах від дошкільних та шкільних закладах освіти з дотриманням вимог ДБН, ТУ, ДСТУ та інших

законодавчих та нормативно-правових актів дійсних на території України.

Розглянемо суцільні залізобетонні конструкції розташовані на зупинках м. Дніпра. Ці конструкції не можуть бути придатні для укриття на 48 годин людей, так як не обладнані в середині вбиральнями, та люди використовують ці споруди як вбиральню, і знаходиться в ній не можливо із-за санітарно-гігієнічних умов. Не деяких зупинках з'явилися поряд з укриттям біо-туалети, але це все одно не відповідає вимогам, так як вбиральня повинна знаходитись в середині укриття а не біля нього.



Рис. 2. Загальний вигляд модульної захисної споруди

Вартість таких конструкцій під назвою «Укриття», «Захисне укриття», «Модульна захисна споруда» у кожного виробника різні назви, становить :

– підготовчі роботи, встановлення на рівну поверхню та збірка одного модуля від 350 000 грн.

– підготовчі земельні роботи, встановлення та збірка одного модуля від 400 000 грн.

А в деяких випадках вартість «модульної захисної споруди ЗС50» (в розрахунку на 50 осіб), а саме під «модульною захисною спорудою ЗС50» заводи-виробники вважають (залізобетонну конструкцію, яка не є захисною спорудою цивільного захисту) – становить 1 600 000 грн, яку ще потрібно улаштувати,

щоб вона стала захисною спорудою цивільного захисту.

Так в одному з дошкільних навчальних закладах було проведено тендер на закупівлю за бюджетні кошти, цієї залізобетонної конструкції яка складається з декількох окремих друг від друга модулів. Ця конструкція згідно договору взагалі названа як «обладнання». Гроші у розмірі 1 600 000 грн. були сплачені заводу-виробнику. Завод-виробник здійснив доставку цих залізобетонних конструкцій на територію даної дошкільної установи. Проектну документацію на будівництво захисної споруди цивільного захисту ніхто не розроблював, та введення в експлуатацію цих конструкцій у такому стані які вони є – неможливо, без додаткових витрат, та

належного влаштування згідно будівельних норм та правил.

При обстеженні було встановлено, що довжина модульної захисної споруди складає 11 000 мм, ширина – 4 300 мм, висота – 2 700 мм. Споруда має яскраве кольорове оформлення, на покрівлі обладнана водонепроникним захисним тентом та оснащена вентиляційною системою. Вона складається з двох модулів, з'єднаних між собою.

Споруда має два входи, доступ до яких здійснюється по стежці, викладеній тротуарною плиткою, з обох сторін. Вхід до захисної споруди реалізується через тамбур, що з внутрішньої сторони обладнаний залізними дверями. Загалом, споруда містить три приміщення.

Приміщення № 1 оформлене дерев'яними лавами для сидіння, пофарбованими в синій колір з обох боків. Стіни оздоблені дошками та пофарбовані. Внутрішнє оснащення включає світильники, вимикачі, розетки та шафу з автоматами. У цьому приміщенні розташовані два дерев'яних стелажі, на лавках знаходяться коробки зі спальниками.

Приміщення № 2 також має дерев'яні лави з обох боків, стіни пофарбовані та оздоблені дошками. Воно оснащено світильниками, вимикачами та розетками. В кінці приміщення облаштований санвузол (приміщення № 3), вхід до якого здійснюється через металеві двері. Санвузол обладнаний переносною мийкою та унітазом (рис. 1) Таким чином, встановлено недотримання законодавчих та нормативних актів, а саме:

Відповідно до ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту» було недотримано:

Захисна проєктуються окремо розташованими, прибудованими та вбудованими.

Прибудовані і вбудовані захисні споруди проєктуються у підземних, цокольних та підвальних поверхах.

Окремо розташовані захисні споруди відносно планувальної позначки землі проєктуються заглибленими або частково

заглибленими (за умови забезпечення встановлених показників їх захисних властивостей).

Окремо розташовані та прибудовані захисні споруди потрібно розміщувати за межами зон можливих завалів від інших будівель.

У разі неможливості розміщення окремо розташованих та прибудованих захисних споруд необхідно додатково забезпечити стійкість зовнішніх огорожувальних конструкцій таких споруд до впливу додаткових навантажень (динамічних та статичних), що можуть виникнути при руйнуванні інших будівель або споруд внаслідок впливу небезпечних чинників (факторів).

Відповідно до ДСТУ 9195:2022 «Швидкоспоруджувані захисні споруди цивільного захисту модульного типу» було не дотримано:

ШСС модульного типу повинні мати мінімально необхідний склад основних та допоміжних приміщень, що забезпечать їх функціонування за призначенням. До таких приміщень належать: – приміщення для осіб, що підлягають укриттю; – приміщення для встановлення фільтровентиляційного та вентиляційного обладнання, засобів регенерації повітря; – тамбур-шлюзи; – приміщення для зберігання забрудненого одягу; – приміщення для розміщення резервних (автономних) джерел електропостачання (акумуляторних батарей, дизельної електростанції) та апаратів керування внутрішніми електричними мережами й електрообладнанням; – санітарний вузол; – приміщення для зберігання запасу питної води та продовольства; – медичний пост.

У складі ШСПРУ модульного типу передбачають такі окремі приміщення: – приміщення для осіб, що підлягають укриттю; – санітарний вузол (у ШСПРУ місткістю до 20 осіб, якщо в ньому немає водопроводу та каналізації – приміщення для встановлення виносної тари для нечистот); – приміщення для встановлення вентиляційного обладнання; – приміщення для зберігання забрудненого одягу.

Загальні розміри приміщень для перебування осіб, що підлягають укриттю, визначають, враховуючи норму площі підлоги на одну особу, яку треба брати з розрахунку не менше ніж $0,5 \text{ м}^2$ у разі двоярусного й $0,4 \text{ м}^2$ – у разі триярусного розташування місць для сидіння (лежання).

6.1.14 Приміщення для перебування осіб, що підлягають укриттю, обладнують місцями для сидіння й лежання. Кількість місць для лежання в ШСЗ модульного типу потрібно визначати у співвідношенні: – 20 % – для ШСЗ із двоярусним розташуванням місць для лежання; – 30 % – для ШСЗ із триярусним розташуванням місць для лежання.

6.1.15 В основних приміщеннях ШСПРУ місця для лежання повинні становити не менше ніж 15 % – у разі одноярусного, 20 % – у разі двоярусного й 30 % – у разі триярусного розташування таких місць.

6.1.16 У ШСЗЦЗ модульного типу рекомендовано облаштування відкидних місць для сидіння та лежання, що закріплюють по периметру стін основних приміщень.

6.1.17 Висота приміщень захисної споруди повинна становити не менше ніж 2,0 м. Якщо висота приміщень становить від 2,3 м до 2,9 м, рекомендовано двоярусне розташування місць для сидіння та лежання, а за висоти від 2,9 м і більше – триярусне.

Місця для сидіння в приміщеннях для осіб, що підлягають укриттю, треба передбачати з розрахунку не менше ніж $0,45 \times 0,45 \text{ м}$ на одну особу, а місця для лежання – $0,55 \times 1,8 \text{ м}$.

Для ШСЗЦЗ модульного типу, що планують встановлювати нижче рівня землі, має бути забезпечено надійну гідроізоляцію, що забезпечує захист їх від можливого затоплення (підтоплення) ґрунтовими, дощовими та паводковими водами.

ШСЗЦЗ модульного типу повної заводської готовності, окремі конструкції (блок-модулі) ШСЗЦЗ модульного типу повинні бути готовими до встановлення на підготовлений майданчик (у котлован), монтування (складання) чи будівництва та подальшого використання за призначенням.

У разі розміщення ШСЗЦЗ на поверхні

землі досягнення необхідних захисних властивостей здійснюють: – насипанням брустверів; – встановленням габіонів; – обкладанням залізобетонними (бетонними) виробами (блоками та панелями); – облаштуванням багатошарових захисних екранів; – комбінованим способом (з використанням зазначених вище матеріалів і технологій); – використанням інших матеріалів і технологій, що забезпечують відповідні розрахункові захисні властивості.

ШСЗЦЗ модульного типу необхідно обладнувати системами вентиляції, опалення, водопостачання, водовідведення, кондиціонування, електропостачання та системами зв'язку відповідно до вимог ДБН В.2.2-5 [7].

Для забезпечення нормативного температурно-вологісного режиму в ШСЗЦЗ модульного типу повної заводської готовності, окремих конструкціях (блок-модулях) необхідно застосовувати автономні системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря на електричній енергії.

ШСЗЦЗ модульного типу має бути обладнано системою водопостачання, що забезпечує подавання води до умивальників, а для ШСЗЦЗ модульного типу повної заводської готовності також до туалетної системи.

Системи вентиляції, опалення, водопостачання, водовідведення та електропостачання в ШСЗЦЗ модульного типу повинні забезпечувати необхідні умови для перебування в них осіб, що підлягають укриттю, протягом 48 год, зокрема й у режимі фільтровентиляції – 12 год, у режимі повної ізоляції (регенерації повітря) – 6 год.

Вимоги щодо пожежної безпеки. ШСЗС модульного типу має бути обладнано системами раннього виявлення та оповіщення про пожежу, первинними засобами пожежогасіння відповідно до чинних технічних вимог НАПБ А.01.001 [6].

Згідно з вищевикладеним під час час обстеження будівель рекомендують враховувати вимоги щодо забезпечення

захисту в них населення від дії повітряної ударної хвилі при застосуванні звичайних засобів ураження та побічної дії сучасної зброї масового ураження, дії звичайних засобів ураження (стрілецької зброї, уламків ручних гранат, артилерійських боєприпасів та авіаційних бомб), негативного впливу від інших будівель, споруд, інженерних мереж, руйнування (аварії) на яких може призвести до травмування або загибелі населення, що підлягає укриттю, зовнішнього іонізуючого випромінювання (у разі радіоактивного забруднення місцевості).

Так, основне правило для всіх укриттів (не тільки у закладах освіти) – це те, що обладнання має забезпечувати можливість безперервного перебування в них населення впродовж не менше 48 годин. Тому, окрім місць для сидіння, там мають бути передбачені і місця для лежання – лавки, стільці, ліжка, спортивні мати, каремати тощо.

1. Відстань. Укриття мають бути розташовані у складі основної будівлі закладу освіти або на відстані не більше 500 м до неї (рекомендується до 100 м у зв'язку з тим, що швидкість надходження інформації про повітряну тривогу може по-різному варіюватися).

2. Комунікації. Укриття повинні бути забезпечені електроживленням, штучним освітленням, системами водопроводу та каналізації. За відсутності в об'єктах будівництва водопостачання і каналізації, вони повинні мати запас бутильованої води та окремі приміщення для встановлення виносних ємностей для нечистот.

Окрім основного, має бути передбачене резервне штучне освітлення (електричні ліхтарі, свічки, газові лампи тощо). Ємностями з питною водою розраховуються як 2 л на добу на одну особу. Також має бути технічна вода, якщо відсутнє централізоване водопостачання. Виносні баки, для нечистот повинні щільно закриватися. Крім того, в укриттях мають бути контейнери для зберігання продуктів харчування.

У приміщеннях мають бути передбачені засоби зв'язку та оповіщення (телефон,

радіоприймач, мережа інтернет. Рекомендовано встановлення Wi-Fi-роутерів.

3. Відсутність отворів. Укриття не повинні мати великих отворів у зовнішніх огорожувальних конструкціях, а наявні отвори (крім дверних) забезпечують можливість їх закладки (мішками з піском або ґрунтом, бетонними блоками, цегляною кладкою тощо).

4. Виходи. Вони повинні бути забезпечені не менше ніж двома евакуаційними виходами, один з яких може бути аварійним. Якщо нормативна кількість людей в укритті менше 50 осіб, то дозволяється один евакуаційний вихід, але при цьому повинен бути передбачений аварійний лаз.

5. Проходи. Висота приміщень об'єктів, зокрема дверних отворів, має становити не менше 2 м (в окремих випадках не менше 1,8 м). Ширина дверних отворів повинна становити не менше 0,9 м (в окремих випадках не менше 0,8 м). Перетинання дверних отворів будівельними конструкціями або інженерними комунікаціями не допускається.

Отвори при входах (виходах) мають закриватися посиленими дверми із негорючих матеріалів (металевими або дерев'яними, оббитими залізом) або захисними екранами (кам'яними, цегляними або залізобетонними) на висоту не менше 1,7 м.

6. Безпека. Через приміщення, призначені для перебування населення не мають проходити водопровідні та каналізаційні магістралі, інші магістральні інженерні комунікації (за винятком внутрішньобудинкових інженерних мереж).

Укриття має перебувати у задовільному санітарному та протипожежному стані (відповідно до норм протипожежних та санітарних правил).

Також у приміщеннях мають бути первинні засоби пожежогасіння (відповідно до встановлених норм для приміщень відповідного функціонального призначення), шанцевий інструмент (лопати штикові та совкові, лом, сокири, пилки-

ножівки по дереву, по металу тощо), засоби надання медичної допомоги. За змоги, найпростіші укриття забезпечуються додатковим обладнанням, інструментами та інвентарем відповідно до норм, установлених для захисних споруд.

7. Місткість. Вираховується з розрахунку: 0,6 м² площі основних приміщень на одну особу. За можливості розміщення двоярусних настилів площу може бути зменшено до 0,5 м² на одну особу, при триярусних – до 0,4 м² на одну особу.

8. Товщина стін. У разі використання приміщень на перших поверхах необхідні захисні властивості як правило забезпечують об'єкти зі стінами 2–2,5 цеглини завтовшки, або з цільних залізобетонних конструкцій (блоків, панелей) товщиною від 56 см. Відповідні захисні властивості також забезпечує шар ґрунту товщиною 67–78 см (мішок з піском (ґрунтом), укладений поперек конструкції (ряду)).

9. Таблички. Біля входних дверей до споруди подвійного призначення (найпростішого укриття) має вивішуватися табличка розміром 50×60 см з написом «Місце для УКРИТТЯ». На ній необхідно зазначити адресу місця розташування споруди, її балансоутримувача, адресу і місце зберігання ключів. У приміщеннях та на будівлях мають бути покажчики руху до укриттів – зі стрілками, вказівками та адресами [9].

Отже стоїть ця конструкція нікому не потрібна, та не знають, що взагалі з нею робити – тому що необхідні, ще додаткові витрати з бюджету.

В одному містечку України теж для дошкільного закладу придбали таку конструкцію, але дешевшу та на невелику кількість осіб, та першочергово зробили проект на виконання будівельних робіт. Цю конструкцію заглибили під землю та улаштували мінімальними вимогами, та ввели в експлуатацію.

Таким чином можна сказати, що:

– з таких конструкцій можна побудувати захисну споруду цивільного захисту, найпростіше укриття, споруду подвійного призначення дуже швидко, але ціна такої конструкції враховуючи те, що потрібно ще виконати ряд інших умов щоб ця конструкція стала дійсно «Захисною спорудою цивільного захисту» м'яко кажучи «дорогоцінна», для використання бюджетних коштів під час дії воєнного стану;

– перш ніж встановлювати такі конструкції необхідно поміркувати, чи доцільно за такі кошти будувати з них «Захисну споруду цивільного захисту», та чи не дешевше буде для витрат бюджетних коштів влаштувати найпростіше укриття в підвалах дошкільних закладів;

– коли неможливо влаштувати легке укриття в підвалі, тоді з модульних конструкцій можна швидко побудувати ці споруди за умовою дотримання вимог ДБН та інших регулюючих документів;

– перш ніж закуповувати конструкції та матеріали необхідно зробити проектно-кошторисну документацію, проект виконання робіт, проект організації будівництва та інше;

– при новому будівництві будівель і споруд необхідно дотримуватись законодавчих та нормативно-правових актів у галузі цивільної безпеки, пожежної безпеки, охорони праці та безпеки життєдіяльності, будівельних норм і правил.

– використовувати бюджетні кошти за призначенням.

Висновки

Проведений аналіз дав змогу:

1. Визначені порушення при виготовленні та розміщенні захисних модульних споруд.

2. Визначені основні критерії до виготовлення та розміщення захисних споруд на території України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пилипенко Я. Нове укриття за декілька днів : як на Prozorro купують модульні сховища. DOZORRO: сайт. 13.10.2023. URL: <https://dozorro.org/blog/nove-ukrittya-za-dekilka-dniv-yak-na-prozorro-kupuyut-modulni-shovisha>

2. ДСТУ 9195:2022. Швидкоспоруджувані захисні споруди цивільного захисту модульного типу. (Національний стандарт України).
3. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Київ : Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104666 (Державні будівельні норми України).
4. Сховище цивільної оборони. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/>
5. Захисні споруди цивільного захисту. Gov.ua : Державні сайти України. URL: <https://www.if.gov.ua/civilnij-zahist/zahisni-sporudi-civilnogo-zahistu>.
6. НАПБ А.01.001–2014. Правила пожежної безпеки в Україні, затверджені наказом МВС від 30.12.2014 № 1417. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60541
7. ДБН В.2.2-5–97. Будинки і споруди. Захисні споруди цивільного захисту, затверджені наказом Держкоммістобудування України від 08.07.1997 № 106. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4653
8. Якими мають бути укриття у школах і садочках – вимоги ДСНС. *Полтавщина* : інтернет-видання. 09.09.2022. URL: <https://poltava.to/news/67319/>

REFERENCES

1. Pylypenko Ya. *Nove ukrittta za dekilka dniv yak na prozorro kupuyut modulni shovisha* [A new shelter in a few days: how to buy modular storage units on Prozorro]. DOZORRO: web-site, 13.10.2023. URL: <https://dozorro.org/blog/nove-ukrittta-za-dekilka-dniv-yak-na-prozorro-kupuyut-modulni-shovisha> (in Ukrainian).
2. DSTU 9195:2022. *Shvydkosporudzhuvani zakhysni sporudy tsyvil'noho zakhystu modul'noho typu* [DSTY 9195:2022. Rapidly constructed protective structures of civil defense of the modular type]. National Standart of Ukraine. (in Ukrainian).
3. DBN V.2.2-5:2023. *Zakhysni sporudy tsyvil'noho zakhystu* [DBN B.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). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104666 (in Ukrainian).
4. *Skhovyshche tsyvil'noyi oborony* [Protective shelters for civil defense]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Сховище_цивільної_оборони (in Ukrainian).
5. *Zakhysni sporudy tsyvil'noho zakhystu* [Protective shelters]. Gov.ua : State sites of Ukraine. URL: <https://www.if.gov.ua/civilnij-zahist/zahisni-sporudi-civilnogo-zahistu> (in Ukrainian).
6. NAPB A.01.001-2014. *Pravyla pozhezhnoyi bezpeky v Ukrayini, zatverdzeni nakazom MVS vid 30.12.2014 № 1417* [NAPB A.01.001-2014. Fire safety in Ukraine, approved by the order of the Ministry of Internal Affairs dated 12.30.2014 No. 1417, registered in the Ministry of Justice of Ukraine 05.03.2015 from no. 252/26697]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60541 (in Ukrainian).
7. DBN V.2.2-5–97. *Budynky i sporudy. Zakhysni sporudy tsyvil'noho zakhystu, zatverdzeni nakazom Derzhkommistobuduvannya Ukrayiny vid 08.07.1997 № 106* [DBN B.2.2-5–97. Buildings and structures. Protective structures of civil protection, approved by the order of the State Committee for Urban Development of Ukraine 08.07.1997 no. 106]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4653 (in Ukrainian).
8. *Yakymy mayut' buty ukryttta u shkolakh i sadochkakh – vymohy DSNS* [What should be the shelters in schools and kindergartens – the requirements of the State Emergency Service]. 09.09.2022. *Poltavshchyna* : internet-vydannya [Poltava region : online edition]. URL: <https://poltava.to/news/67319/> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.02.2025.

УДК 331:53.082.79:622.8:331.4

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.18.1139

ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ В УКРАЇНІ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ПИЛИПЕНКО О. В.², *канд. техн. наук, доц.*,
РУДЕНКО В. П.^{3*}, *асп.*

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

² Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки. Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: pylypenko.oleksandr@pdaba.edu.ua, тел. +38 (056) 756-34-73, ORCID ID: 0009-0007-2987-7905

^{3*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки. Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: rudenko.vacheslav@365.pdaba.edu.ua, тел. +38 (056) 756-34-73, ORCID ID: 0009-0000-6641-8002

Анотація. Радіаційна безпека є одним із ключових аспектів охорони здоров'я та захисту довкілля в Україні, особливо враховуючи розвинену атомну енергетику та наслідки минулих аварій, таких як Чорнобильська катастрофа. Основними джерелами радіаційного забруднення є як природні, так і антропогенні фактори, включаючи видобуток і переробку урану, експлуатацію атомних електростанцій, використання радіоактивних матеріалів у промисловості та медицині, а також накопичення радіоактивних відходів на таких об'єктах, як Придніпровський хімічний завод (ПХЗ). Стаття висвітлює законодавчі, технологічні та профілактичні заходи, спрямовані на забезпечення радіаційної безпеки, а також аналізує поточний стан радіаційного забруднення та ризики, пов'язані з відходами на ПХЗ, який є одним із найбільших джерел радіоактивного забруднення в регіоні. **Мета статті** – проведення комплексного аналізу поточного стану радіаційної безпеки в Україні, визначення основних джерел радіаційного забруднення та оцінка ефективності заходів зменшення впливу радіації на здоров'я населення та довкілля. Особлива увага приділена законодавчим аспектам, технологічним рішенням, вдосконаленню системи моніторингу та взаємодії з міжнародними організаціями, такими як МАГАТЕ, для забезпечення дотримання найвищих стандартів радіаційної безпеки. **Висновок.** 1. Важливим завданням є вдосконалення системи управління радіаційними ризиками, зокрема посилення державного контролю, модернізація технологій моніторингу та впровадження нових стандартів безпеки. 2. Значну увагу слід приділити об'єктам з радіоактивними відходами, таким як ПХЗ, де необхідні систематичні рекультивацийні заходи для зменшення впливу на довкілля та здоров'я населення. 3. Впровадження сучасних технологій моніторингу, таких як автоматизовані системи контролю рівнів радіації, є важливим для оперативного реагування на підвищені рівні радіації. 4. Необхідно продовжувати міжнародну співпрацю з організаціями, такими як МАГАТЕ, для впровадження передових практик у сфері радіаційної безпеки, що сприятиме підвищенню безпеки на атомних електростанціях та забезпеченню сталого розвитку країни. 5. Результати дослідження підтверджують необхідність комплексного підходу до зниження радіаційних ризиків, що включає як технічні, так і соціальні заходи, спрямовані на покращення умов праці, збереження здоров'я працівників та захист довкілля від негативного впливу радіації.

Ключові слова: *радіаційна безпека; атомна енергетика; радіаційне забруднення; Чорнобильська катастрофа; Придніпровський хімічний завод; управління радіоактивними відходами; охорона здоров'я; нормативне регулювання; міжнародне співробітництво; моніторинг радіаційного фону; рекультивация*

GENERAL ISSUES OF RADIATION SAFETY IN UKRAINE

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
PYLYPENKO O.V.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
RUDENKO V.P.^{3*}, *Postgrad. Stud.*

¹ Department of Occupational Safety, 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, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, tel. +38 (056) 756-34-73, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Department of Occupational Safety, 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, e-mail: pylypenko.oleksandr@pdaba.edu.ua, tel. +38 (056) 756-34-73, ORCID ID: 0009-0007-2987-7905

^{3*} Department of Occupational Safety, 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, e-mail: rudenko.vacheslav@365.pdaba.edu.ua, tel. +38 (056) 756-34-73, ORCID ID: 0009-0000-6641-8002

Abstract. Radiation safety is one of the key aspects of health protection and environmental safety in Ukraine, particularly given the developed nuclear energy sector and the consequences of past incidents, such as the Chernobyl disaster. The primary sources of radiation contamination include both natural and anthropogenic factors, such as uranium mining and processing, operation of nuclear power plants, use of radioactive materials in industry and medicine, as well as accumulation of radioactive waste at facilities like the Prydniprovskiy Chemical Plant (PCP). This paper highlights legislative, technological, and preventive measures aimed at ensuring radiation safety, and analyzes the current state of radiation contamination and risks associated with waste at PCP, which is one of the major sources of radioactive contamination in the region. **The purpose of this study** is to conduct a comprehensive analysis of the current state of radiation safety in Ukraine, identify the main sources of radiation contamination, and evaluate the effectiveness of measures to mitigate the impact of radiation on public health and the environment. Special attention is paid to legislative aspects, technological solutions, improvement of monitoring systems, and interaction with international organizations, such as the IAEA, to ensure compliance with the highest radiation safety standards. **Conclusion.** 1. It is important to improve the radiation risk management system, particularly through enhanced state control, modernization of monitoring technologies, and the implementation of new safety standards. 2. Significant attention should be paid to facilities with radioactive waste, such as PCP, where systematic reclamation measures are needed to mitigate the impact on the environment and public health. 3. The implementation of modern monitoring technologies, such as automated radiation level control systems, is essential for rapid response to elevated radiation levels. 4. International cooperation with organizations like the IAEA should be continued to introduce best practices in radiation safety, thereby enhancing the safety of nuclear power plants and ensuring the sustainable development of the country. 5. The research findings confirm the need for a comprehensive approach to reducing radiation risks, which includes both technical and social measures aimed at improving working conditions, preserving worker health, and protecting the environment from the negative effects of radiation.

Keywords: radiation safety; nuclear energy; radiation contamination; Chernobyl disaster; Prydniprovskiy Chemical Plant; radioactive waste management; health protection; legislative regulation; international cooperation; radiation monitoring; reclamation

Вступ. Радіаційна безпека є одним із найважливіших аспектів охорони здоров'я населення та захисту довкілля, особливо в країнах, що мають розвинену атомну енергетику та стикаються з наслідками минулих аварій [1]. Атомна енергетика є важливим джерелом електроенергії, проте її експлуатація пов'язана з певними ризиками, які потребують особливої уваги та контролю [2]. Радіаційна безпека передбачає не лише технічні заходи для зменшення радіаційних ризиків, але й ефективну систему законодавчого регулювання [3], обізнаність населення та наявність готових планів реагування на аварійні ситуації.

Актуальність. Україна, як країна, що зазнала катастрофічних наслідків Чорнобильської аварії 1986 року, має досвід управління радіаційними ризиками, що включає як природні джерела радіації, так і антропогенні [4]. Після Чорнобильської катастрофи було створено цілу систему

державного регулювання радіаційної безпеки, яка охоплює як профілактичні заходи, так і засоби контролю та ліквідації наслідків можливих аварій [5]. До основних завдань належать моніторинг радіаційного фону, зменшення впливу радіації на людей, регулювання діяльності атомних станцій, управління радіоактивними відходами, а також створення та вдосконалення законодавчої бази [2; 3; 5]. Крім Чорнобильської аварії, в Україні існують інші потенційні джерела радіаційного забруднення, зокрема уранові родовища, радіоактивні відходи та технологічні матеріали, що використовуються в промисловості та медицині [6]. Ризики, пов'язані з видобутком та переробкою урану, також створюють додаткові виклики для системи радіаційної безпеки [7]. У цих умовах особливого значення набуває взаємодія з міжнародними організаціями, такими як МАГАТЕ (Міжнародне агентство

з атомної енергії), для забезпечення дотримання найвищих стандартів безпеки [1].

Методи дослідження. Методи дослідження включають аналіз радіаційних ризиків, оцінку радіаційного фону та впливу радіаційного забруднення на здоров'я населення та довкілля. Зокрема, застосовано порівняльний аналіз нормативних документів з міжнародними стандартами радіаційної безпеки [8], Використані системи автоматизованого моніторингу, а також проведено дослідження даних щодо радіаційного забруднення на хвостосховищах колишнього підприємства уранового циклу Придніпровський хімічний завод у м. Кам'янське та в інших промислових об'єктах.

Задачі дослідження. Визначення поточного стану радіаційної небезпеки в Україні, визначення основних джерел радіаційного забруднення природного та антропогенного походження, аналіз заходів забезпечення радіаційної безпеки, таких як нормативне регулювання та сучасні технології моніторингу. Вивчення впливу радіаційного забруднення на здоров'я населення, оцінка ефективності заходів модернізації систем безпеки на атомних електростанціях і в управлінні радіоактивними відходами, а також розробка рекомендацій щодо підвищення рівня радіаційної безпеки та мінімізації радіаційних ризиків.

Основна дослідна частина. Радіаційна безпека є важливою складовою державної політики в Україні [1]. Розглянуто поточний стан радіаційної небезпеки в Україні, джерела радіаційного забруднення, а також заходи щодо забезпечення радіаційної безпеки, включаючи нормативні документи, сучасні технології моніторингу та досвід

інших країн у сфері зменшення радіаційних ризиків.

Природні джерела. Природний радіаційний фон формується в основному через космічне випромінювання та радіоактивні елементи, що містяться в земній корі, повітрі та воді [9]. Космічне випромінювання надходить від Сонця та інших джерел у Всесвіті, і його вплив залежить від висоти місцевості над рівнем моря. Радіоактивні елементи, такі як уран (U-238), торій (Th-232) та калій (K-40), природно знаходяться в ґрунті і навіть у будівельних матеріалах, що використовуються в Україні. Наприклад, граніт, базальт, пісок та інші матеріали можуть містити радіоактивні елементи, що спричиняють підвищений рівень радіації у будинках [6].

Граніт має рівень радіації від 0,1 до 0,3 мкЗв/рік через наявність у ньому урану, торію та калію-40. Він широко використовується в оздобленні інтер'єрів та екстер'єрів. Базальт, що застосовується в дорожньому будівництві та виготовленні кам'яних виробів, містить торій і уран з рівнем радіації від 0,05 до 0,15 мкЗв/рік. Пісок і гравій також часто використовуються у будівництві та мають менші рівні радіації (від 0,01 до 0,05 мкЗв/рік), завдяки присутності радію-226 та торію [6].

Також природний радіаційний фон формується завдяки радону-222, газу, що утворюється при розпаді урану [9]. Радон може накопичуватися у приміщеннях, особливо у підвалах і погано вентильованих будівлях, що підвищує ризик раку легенів серед населення. У деяких регіонах рівень радону може досягати 10–20 мЗв/рік, що значно перевищує безпечні рівні [4].

Таблиця 1

Рівень радіації природних будівельних матеріалів

Матеріал	Основні радіоактивні елементи	Рівень радіації (мкЗв/рік)
Граніт	Уран, Торій, Калій-40	0.1–0.3
Базальт	Торій, Уран	0.05–0.15
Пісок	Радій-226, Торій	0.01–0.05
Гравій	Калій-40, Уран	0.02–0.07
Вапняк	Радон-222	0.01–0.03

Антропогенні джерела. Внаслідок діяльності людини відбувається додаткове радіаційне забруднення, що включає видобуток і переробку урану, експлуатацію атомних електростанцій, а також використання радіоактивних матеріалів у промисловості та медицині [7]. Особливу небезпеку становить Чорнобильська аварія, під час якої у довкілля було викинуто близько 50 млн кюрі радіоактивних речовин, таких як йод-131, цезій-137 та стронцій-90. Зона відчуження навколо Чорнобильської АЕС донині залишається однією з найбільш радіоактивно забруднених територій у світі [4].

Ще одним антропогенним джерелом радіаційного забруднення є видобуток і переробка урану. У процесі видобутку утворюються значні обсяги радіоактивного пилу та відходів, які можуть забруднювати

грунт, воду та повітря. Уранові родовища в Кіровоградській області створюють загрозу для місцевого населення та екології, адже рівень радіаційного фону в околицях таких об'єктів може перевищувати нормативні значення у кілька разів [7].

Техногенні будівельні матеріали містять підвищені рівні радіації через процеси їхнього промислового виготовлення або використання відходів, що мають радіоактивні елементи. Зола від спалювання вугілля є одним із таких прикладів. Вона утворюється при спалюванні вугілля на електростанціях, де природно присутні уран і торій концентруються в золі. Рівень радіації в такій золі може коливатися від 0,2 до 0,5 мкЗв/рік і вона часто використовується як наповнювач у будівельних матеріалах таких як бетон [6].

Таблиця 2

Рівень радіаційної активності техногенних будівельних матеріалів

Матеріал	Основні радіоактивні елементи	Рівень радіації (мкЗв/рік)
Зола від спалювання вугілля	Торій, Уран	0.2–0.5
Металеві відходи	Радіоактивні метали	До 1.0
Шлак	Радій-226, Торій-232	0.2–0.6
Фосфогіпс	Радій-226	0.1–0.3
Кераміка	Торій, Уран	0.05–0.2

Металеві відходи, які виникають у процесах переробки металів, також можуть містити радіоактивні метали, особливо якщо ці матеріали піддавалися впливу джерел радіації. Такий матеріал може мати рівень радіації до 1,0 мкЗв/рік. Його використання у будівництві потребує ретельного контролю, щоб уникнути додаткових ризиків для здоров'я людей [6].

Наслідки радіаційного забруднення. Радіаційне забруднення має значні наслідки для здоров'я людей та довкілля. Наприклад, радіонукліди, які потрапили в атмосферу та ґрунт, продовжують впливати на людей через харчовий ланцюг [9]. Після аварії на Чорнобильській АЕС спостерігалось значне зростання захворюваності на рак щитовидної залози, особливо серед дітей, які проживали у забруднених регіонах [4]. Радіоактивний газ радон, що утворюється при розпаді урану, є ще одним значним

джерелом небезпеки для здоров'я людей, оскільки він може накопичуватися у приміщеннях і підвищувати ризик розвитку раку легенів.

У випадках аварій на ядерних об'єктах, таких як Чорнобильська катастрофа, радіоактивні речовини, що були викинуті в атмосферу, забруднили понад 200 000 км² території Європи. В Україні були евакуйовані понад 116 000 людей з найбільш забруднених територій, і ще близько 220 000 осіб були переселені протягом наступних років [4]. Довгострокові екологічні та медичні наслідки таких аварій включають значне збільшення випадків онкологічних захворювань, ураження імунної системи та інші негативні впливи на здоров'я населення. Після аварії на Чорнобильській АЕС науковці зафіксували підвищення рівня раку щитовидної залози, лейкемії та інших

форм онкологічних захворювань серед населення, яке проживало у зоні радіаційного забруднення [9]. Радіоактивні речовини, такі як цезій-137 та стронцій-90, які мають тривалий період напіврозпаду (понад 30 років), досі залишаються основними джерелами забруднення в зоні відчуження.

Стан радіаційна безпека в Україні. Після аварії на Чорнобильській АЕС Україна розробила комплексну систему забезпечення радіаційної безпеки. Основними нормативними документами, що регулюють радіаційну безпеку, є Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [2] та Закон «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання» [3]. Ці закони встановлюють допустимі рівні опромінення для населення, а також регулюють діяльність підприємств, що використовують ядерні матеріали [5].

Державна інспекція ядерного регулювання України та Державне агентство з управління зоною відчуження здійснюють постійний моніторинг рівнів радіації та контроль за виконанням норм безпеки. Зокрема, з метою зменшення впливу радіоактивних відходів в Україні було побудовано Централізоване сховище відпрацьованого ядерного палива, що дозволяє безпечно зберігати радіоактивні матеріали без необхідності їх експорту. Крім того, впроваджуються державні програми, спрямовані на моніторинг і контроль за радіаційним фоном у зонах радіаційного забруднення, таких як Чорнобильська зона відчуження [4]. Застосовуються новітні методи радіаційного моніторингу та використовуються автоматизовані системи контролю, що дозволяють оперативно реагувати на підвищення рівнів радіації.

Стан радіаційної безпека на атомних електростанціях. Україна має чотири діючі атомні електростанції (АЕС): Запорізьку, Рівненську, Хмельницьку та Південноукраїнську, що забезпечують значну частину електроенергії країни. Після аварії на Чорнобильській АЕС було розроблено програму модернізації

українських ядерних енергоблоків, що включає впровадження сучасних систем радіаційного моніторингу, оновлення охолоджувальних систем реакторів та підвищення рівня безпеки їх експлуатації [1].

Після аварії на АЕС «Фукусіма-1» в Японії у 2011 році Україна також переглянула свої підходи до забезпечення безпеки на атомних станціях, що включало додаткові заходи з модернізації, інвестиції у системи моніторингу радіації та підвищення безпеки на існуючих і нових ядерних об'єктах. Були впроваджені нові вимоги до оцінки ризиків та планів евакуації на випадок аварій, що включає врахування сценаріїв екстремальних природних явищ, таких як землетруси чи повені [7]. Також на АЕС впроваджуються додаткові заходи для підвищення стійкості до втрати енергопостачання, модернізація систем охолодження реакторів, а також оновлення обладнання, що забезпечує безпеку зберігання відпрацьованого ядерного палива. Українські атомні електростанції постійно проходять перевірки на відповідність міжнародним стандартам безпеки, що дозволяє забезпечувати їх безаварійну експлуатацію [1].

Проблеми управління радіоактивними відходами. Однією з найбільших проблем радіаційної безпеки в Україні є управління радіоактивними відходами, що накопичилися внаслідок експлуатації ядерних об'єктів, медичної та промислової діяльності. Значні обсяги відходів зберігаються на територіях уранових родовищ та колишніх підприємств уранового циклу, таких як Придніпровський хімічний завод (ПХЗ) у м. Кам'янське. На ПХЗ зберігається понад 42 мільйони тонн радіоактивних відходів, загальна активність яких становить від 2 000 до 18 000 кюрі. Ці відходи залишилися на території заводу у відкритих і приповерхневих сховищах, що створює серйозну екологічну та радіаційну загрозу. Основні екологічні проблеми включають виділення радіоактивного пилю, виділення радону-222, забруднення

грунтових вод та тривалу радіоактивність відходів [4].

Таблиця 3

Основні екологічні загрози на ПХЗ

Джерело загрози	Тип забруднення	Можливі наслідки
Радіоактивний пил	Забруднення повітря	Рак легенів, ураження дихальних шляхів
Радон-222	Газове забруднення	Рак легенів
Забруднення ґрунтових вод	Радіонукліди у воді	Забруднення водних ресурсів

Виділення радіоактивного пилу з відкритих сховищ може призводити до забруднення довкілля на значні відстані, особливо в умовах вітрової ерозії. Радон-222, що утворюється при розпаді урану, є однією з основних причин раку легенів у людей, які тривалий час піддаються його впливу [9]. Забруднення ґрунтових вод радіоактивними матеріалами також становить значну загрозу для водних ресурсів регіону.

Для контролю за рівнями радіації та забезпечення радіаційної безпеки на ПХЗ було створено систему моніторингу радіаційного фону, яка дозволяє здійснювати постійний контроль рівнів гамма-випромінювання та інших типів іонізуючого випромінювання [4]. Крім того, впроваджуються рекультиваційні заходи, спрямовані на зменшення впливу радіоактивних відходів на довкілля та здоров'я населення.

Висновки

1. Радіаційна небезпека залишається однією з головних екологічних та соціальних проблем в Україні, особливо через наслідки Чорнобильської катастрофи та наявність радіоактивних відходів.

2. Ефективне управління радіаційними ризиками потребує сучасних технологій моніторингу, дотримання міжнародних стандартів безпеки та впровадження заходів для мінімізації впливу радіаційного забруднення. Для зниження рівня радіаційних ризиків необхідно забезпечити сталий контроль над зоною відчуження навколо Чорнобильської АЕС, удосконалити інфраструктуру зберігання та обробки радіоактивних відходів, зокрема на

Придніпровському хімічному заводі, а також здійснювати систематичні рекультиваційні заходи, моніторинг забруднень і захист водних ресурсів.

3. Посилення міжнародного співробітництва в сфері радіаційної безпеки. Україна має продовжувати співпрацю з МАГАТЕ та іншими міжнародними організаціями, впроваджуючи передові практики та технології для зменшення радіаційних ризиків. Така співпраця дозволяє Україні користуватися міжнародним досвідом і підтримкою в модернізації обладнання, вдосконаленні методів моніторингу та підвищенні рівня безпеки на ядерних об'єктах.

4. Комплексний підхід забезпечення радіаційної безпеки, що включає технічні, медичні, освітні та соціальні заходи. Важливо продовжувати інвестувати в наукові дослідження, які дозволяють краще розуміти вплив радіації на здоров'я і розробляти ефективні методи його зменшення, а також створювати ефективні механізми реагування на можливі аварії, що включають як технічне забезпечення, так і підготовку фахівців. Успішна реалізація цих заходів сприятиме зниженню радіаційних ризиків для нинішнього та майбутніх поколінь, а також забезпеченню сталого розвитку країни. Безпечне використання атомної енергії вимагає постійного контролю, модернізації технологій та збереження природного середовища. Лише за умов системного підходу до радіаційної безпеки можна досягти балансу між потребами енергетики та охороною здоров'я людей і довкілля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ). Оцінка впливу радіоактивних викидів на населення та довкілля. *IAEA Safety Report Series*. 2016. 78 с. URL: <https://www.iaea.org/topics/environment> (дата звернення: 24.10.2024 р.).
2. Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» від 16.10.2022 р. *Відомості Верховної Ради України*. 45 с.
3. Закон України «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання» від 14.01.1998 р. *Відомості Верховної Ради України*. 38 с.
4. Радіаційна безпека та управління радіаційними ризиками в Україні: підходи та рішення. *Збірник наукових праць*. Київ : Освіта України, 2020. 210 с.
5. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Вид. офіц. Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 1997. 121 с.
6. Беліков А. С., Калда Г. С., Пилипенко О. В. Радіаційна безпека будівель і споруд з урахуванням інноваційних напрямів у будівництві : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Дніпродзержинськ : Дніпродзержинський державний технічний університет, 2013. 367 с.
7. Зміни навколишнього середовища в оцінці безпеки після закриття сховищ твердих радіоактивних відходів. Звіт Робочої групи 3 Програми МАГАТЕ з екологічного моделювання для радіаційної безпеки (EMRAS II). *IAEA-TECDOC-1799*. 2016. 182 с. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE1799web.pdf>.
8. Директива Ради 2013/59/ЄВРАТОМ від 5 грудня 2013 року «Про встановлення основних норм безпеки для захисту від загроз, зумовлених впливом іонізуючого випромінювання». Вид. офіц. Київ : Державна інспекція ядерного регулювання України, 2014. 156 с. URL: https://snriu.gov.ua/storage/app/sites/1/docs/pereklady_direktiv/radi-201359evratom.pdf (дата звернення: 24.10.2024 р.).
9. Гродзинський Д. М. Радіобіологія : підруч. Київ : Либідь, 2001. 448 с.

REFERENCES

1. *Mizhnarodne ahent-stvo z atomnoyi enerhiyi (MAHATE). Otsinka vplyvu radioaktyvnykh vykydiv na naselennya ta dovkillya* [International Atomic Energy Agency (IAEA). Assessment of the Impact of Radioactive Releases on Population and Environment]. *IAEA Safety Report Series*, 2016, 78 p. URL: <https://www.iaea.org/topics/environment> (Accessed October 24, 2024). (in Ukrainian).
2. *Zakon Ukrayiny "Pro vykorystannya yadernoyi enerhiyi ta radiatsiyu bezpeku" vid 16.10.2022 r.* [Law of Ukraine "On the Use of Nuclear Energy and Radiation Safety" dated October 16, 2022]. *Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrayiny* [Official Gazette of the Verkhovna Rada of Ukraine]. 45 p. (in Ukrainian).
3. *Zakon Ukrayiny "Pro zakhyst lyudyny vid vplyvu ionizuyuchoho vyprominyuvannya" vid 14.01.1998 r.* [Law of Ukraine "On Protection of Humans from Exposure to Ionizing Radiation" dated January 14, 1998]. *Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrayiny* [Official Gazette of the Verkhovna Rada of Ukraine]. 38 p. (in Ukrainian).
4. *Radiatsiyina bezpeka ta upravlinnya radiatsiynymy ryzykamy v Ukrayini : pidkhody ta rishennya* [Radiation Safety and Management of Radiation Risks in Ukraine : Approaches and Solutions]. *Zbirnyk naukovykh prats'* [Collection of Scientific Works]. 2020, Kyiv : Osvida Ukrainy Publ., 210 p. (in Ukrainian).
5. *Normy radiatsiynoyi bezpeky Ukrayiny (NRBU-97). Vyd. ofits.* [Ministry of Health of Ukraine. Radiation Safety Standards of Ukraine (NRBU-97). Official edition]. 1997, Kyiv : Ministry of Health of Ukraine Publ., p. 121. (in Ukrainian).
6. Belikov A.S., Kalda H.S. and Pylypenko O.V. *Radiatsiyina bezpeka budivel' i sporud z urakhuvanniam innovatsiynykh napryamiv u budivnytstvi : navch. posib. dlya stud. vyshch. navch. z akl.* [Radiation Safety of Buildings and Structures Considering Innovative Trends in Construction: Textbook for Students of Higher Educational Institutions]. Dniprodzerzhinsk : Dniprodzerzhynsk State Technical University, 2013, 367 p. (in Ukrainian).
7. *Zminy navkolyshn'oho seredovyscha v otsyntsi bezpeky pislya zakryttya skhovysch tverdykh radioaktyvnykh vidkhodiv. Zvit Robochoyi hrupy 3 Prohramy MAHATE z ekolohichnoho modelyuvannya dlya radiatsiynoyi bezpeky (EMRAS II), IAEA-TECDOC-1799* [International Atomic Energy Agency (IAEA). Environmental Change in Post-Closure Safety Assessment of Solid Radioactive Waste Repositories. Report of Working Group 3 of the IAEA's Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS II) Programme, IAEA-TECDOC-1799]. 2016. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE1799web.pdf> (in Ukrainian).
8. *Dyrektyva Rady 2013/59/EVRATOM vid 5 hrudnya 2013 roku "Pro vstanovlennya osnovnykh norm bezpeky dlya zakhystu vid zahroz, zumovlenykh vplyvom ionizuyuchoho vyprominyuvannya". Vyd. ofits.* [Council Directive 2013/59/EURATOM of December 5, 2013. Establishing Basic Safety Standards for Protection Against Dangers Arising from Exposure to Ionizing Radiation. Official edition]. Kyiv : State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine Publ., 156 p., 2014. URL: https://snriu.gov.ua/storage/app/sites/1/docs/pereklady_direktiv/radi-201359evratom.pdf (Accessed October 24, 2024). (in Ukrainian).
9. Grodzynskyi D.M. *Radiobiolohiya : pidruchnyk* [Radiobiology : textbook]. Kyiv : Lybid Publ., 2001, 448. p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 13.02.2025.

УДК 614.841.45

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.26.1140

ЩОДО ПИТАННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ З ОЦІНКИ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

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

ТОДОРОВ О. П.^{2*}, *асп.*,

КРЕКНІН К. А.³, *канд. техн. наук, доц.*,

ХАРЧЕНКО В. В.⁴,

МЕЩЕРЯКОВА І. В.⁵, *докт. філ. (Ph.D.), доц.*

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

^{2*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 523-22-55, e-mail: 5232255@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

³ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: kreknn.kyrylo@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1812-7400

⁴ Дніпропетровський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, вул. Січеславська Набережна, 17, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: harchenko-76@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7653-3001

⁵ 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: meshcheriakova.i.ryna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1538-2932

Анотація. Постановка проблеми. Застосування будівельних матеріалів, таких як метал, залізобетон, деревина та пластмаси, вимагає вивчення їх пожежно-технічних властивостей. Підвищені температури впливають на конструктивні матеріали, що може призвести до значних змін у їх стані та до обрушення будівельних конструкцій. Пожежна небезпека об'єкта, визначена пожежною небезпекою середовища, включає горіння матеріалів та виділення токсичних продуктів горіння. Важливість вибору будівельних матеріалів при визначенні категорії небезпеки об'єктів є ключовим фактором. **Мета статті** – визначення пожежно-технічних властивостей будівельних матеріалів та розробка методів оцінки їх захисних характеристик. Це включає вивчення впливу високих температур на несучу здатність конструкцій та визначення заходів для зниження ризиків, пов'язаних з пожежною небезпекою. Особлива увага приділяється розробці та випробуванню покриттів, що знижують горючість матеріалів і підвищують їх вогнестійкість, а також встановленню методик для оцінки цих характеристик. **Висновок.** Згідно проведених досліджень встановлено, що високі температури значно впливають на стан будівельних матеріалів, що може призвести до обрушення конструкцій. Тому актуальною задачею на сьогодні є розробка та використання вогнезахисних покриттів, що знижують горючість матеріалів і підвищують їх вогнестійкість. Визначення та розробка надійних методів оцінки характеристик вогнезахисних покриттів дозволить підвищити безпеку експлуатації будівельних конструкцій.

Ключові слова: пожежно-технічні властивості; пожежна небезпека; будівельні матеріали; висока температура; горіння матеріалів; горючість матеріалів; вогнезахисне покриття; будівельні конструкції

REGARDING THE METHODOLOGY FOR ASSESSING THE FIRE HAZARD OF FIRE-RETARDANT COATINGS

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

TODOROV O.P.^{2*}, *Postgrad. Stud.*,

KREKNIN K.A.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

HARCHENKO V.V.³,

MESHCHERIAKOVA I.V.⁵, *PhD, Assoc. Prof.*

¹ Department of Occupational Safety, Civil, and Technogenic Security, 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, e-mail: belicov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Department of Occupational Safety, Civil, and Technogenic Security, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 523-22-55, e-mail: 5232255@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

³ Department of Occupational Safety, Civil, and Technogenic Security, 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, e-mail: krekniin.kyrylo@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1812-7400

⁴ Dnipropetrovsk Scientific Research Expert-Criminalistic Center of the MIA of Ukraine, 17, Str. Sicheslavs'ka Naberejna, Dnipro, 49000, Ukraine, e-mail: harchenko-76@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7653-3001

⁵ Department of Occupational Safety, Civil, and Technogenic Security, 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) 756-34-57, e-mail: meshcheriakova.iryana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1538-2932

Abstract. Problem statement The use of building materials such as metal, reinforced concrete, wood, and plastics necessitates the study of their fire-technical properties. Elevated temperatures affect structural materials, which can lead to significant changes in their condition and the collapse of building structures. The fire hazard of an object, determined by the fire hazard of the environment, includes the combustion of materials and the release of toxic combustion products. The importance of selecting building materials when determining the hazard category of objects is a key factor. **Purpose of the article.** The purpose of the article is to determine the fire-technical properties of building materials and to develop methods for assessing their protective characteristics. This includes studying the impact of high temperatures on the load-bearing capacity of structures and determining measures to reduce risks associated with fire hazards. Special attention is paid to the development and testing of coatings that reduce the flammability of materials and increase their fire resistance, as well as the establishment of methodologies for assessing these characteristics. **Conclusion.** According to the research, it has been established that high temperatures significantly affect the condition of building materials, which can lead to the collapse of structures. The fire hazard of objects largely depends on the materials used in construction and their ability to resist combustion and the spread of flames. The development and use of fire-retardant coatings that reduce the flammability of materials and increase their fire resistance is a very relevant task today. The development of reliable methods for assessing the characteristics of fire-retardant coatings will enhance the safety of building structures.

Keywords: *fire-technical properties; fire hazard; building materials; high temperature; material combustion; material flammability; fire-retardant coating; building structures*

Постановка проблеми. Останнім часом в будівництві широко застосовуються конструкції із металу, залізобетону, деревини, пластмас і інших матеріалів, що вимагає вивчення їх пожежно-технічних властивостей. Згідно теорії надійності [1] час безпечної експлуатації будівельних конструкцій визначається ризиком прояву відказів внаслідок досягнення межі втрати несучої здатності (перший граничний стан) і досягнення прояву в конструкціях динамічних або статичних зміщень (другий граничний стан).

В залежності від конструктивних особливостей при дії високих температур в результаті накопичування негативних проявів відбуваються значні зміни стану матеріалів, що призводить до стрибкоподібних зрушень будівельних матеріалів, обрушенню будівельних конструкцій.

При розвитку пожежі пожежна небезпека середовища визначає небезпеку об'єкта в цілому в результаті обрушення

будівельних конструкцій, горіння матеріалів, в тому числі будівельних матеріалів та виділення токсичних продуктів горіння.

Тому вибір матеріалів, будівельних конструкцій при визначенні категорії небезпеки об'єктів мають першочергове значення.

Дуже важливою характеристикою при прогнозуванні безпеки експлуатації будівель і споруд є здібність будівельних матеріалів і конструкцій виявляти опір, що призводить до втрати основних властивостей та нерозповсюдженню полум'я по своїй поверхні.

Враховуючи зміни несучої здатності будівельних конструкцій при дії високих температур для зниження ризику небезпеки, необхідно визначити захисні заходи, які сповільнюють розвиток негативних проявів в матеріалах і конструкціях.

Враховуючи горючість матеріалів на основі органіки та розповсюдження полум'я по їх поверхні, для їх захисту в останній час

все більше приділяється уваги розробці покриттів, в тому числі вспінюючих, що дозволяє знизити горючість матеріалів та розповсюдження полум'я по їх поверхні.

В той же час, будівельні конструкції на основі конструктивних металів (сталь, сплави алюмінію, тощо) через високу теплопровідність швидко прогриваються до критичних температур, що потребує застосування різних захисних засобів, в тому числі покриттів, для підвищення їх вогнестійкості.

Таким чином, розробка покриттів, які дозволяють істотно знизити горючість матеріалів, підвищити вогнестійкість будівельних конструкцій, вимагає визначення надійних методів оцінки їх характеристик. Проведений нами аналіз свідчить, що різні підходи при визначенні захисних властивостей покриттів створюють труднощі при зіставленні одержаних по них результатів. Проведення стратегічного курсу країни з урахуванням інтеграції в Євросоюз дозволило визначити основні методичні підходи пожежної небезпеки вогнезахисних покриттів, що створюють основну методику оцінки їх характеристик.

Мета статті – є визначення пожежно-технічних властивостей будівельних матеріалів, розробка методів оцінки їх захисних характеристик, вивчення впливу високих температур на несучу здатність конструкцій та визначення заходів для зниження ризиків, пов'язаних з пожежною небезпекою.

Результати досліджень. Так, при визначенні пожежонебезпечності речовин і матеріалів, в тому числі нових захисних вспінюючих покриттів запропоновано випробування проводити згідно з вимогами ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація [2]. Експериментальні методи дослідження при визначенні групи негорючих матеріалів наведені в ДСТУ EN ISO 1716:2023 Випробування будівельних виробів щодо реакції на вогонь. Визначення вищої теплоти згорання (теплотворної здатності)

(EN ISO 1716:2018, IDT; ISO 1716:2018, IDT) та ДСТУ EN ISO 1182:2022 Випробування будівельних виробів щодо реакції на вогонь. Випробування на негорючість (EN ISO 1182:2020, IDT; ISO 1182:2020, IDT) [3; 4; 12].

Згідно методу експериментального визначення групи важкогорючих і горючих твердих речовин і матеріалів, оцінювання неметалевих матеріалів проводиться при присутності у своєму складі більш 3 % органічних речовин. Дослідження проводяться в керамічній реакційній камері прямокутної форми висотою 295 ± 2 мм з перерізом зі стороною 88 ± 2 мм та внутрішньовстановлений газовий пальник та механізм введення зразка з тримачем. Для випробування виготовляються три зразка матеріалу шириною 60 ± 1 мм, висотою 150 ± 3 мм і фактичною товщиною до 30 мм. Підготовлені зразки витримуються у вентиляційній сушильній шафі за температурою 60 ± 5 °C не менш ніж 20 годин, потім охолоджувалися до температури довкілля. Зразки одного матеріалу не повинні відрізнятися більш ніж на 2 %. Для вимірювання температури газоподібних продуктів горіння використовується термопара з діапазоном вимірювання від 0 °C до 1 000 °C.

При оцінюванні результатів виміру визначається максимальний приріст температури ($\Delta t_{\max}$):

$$\Delta t_{\max} = t_{\max} - t_0, \quad (1)$$

де $t_{\max}$ – максимальна температура газів; t_0 – температура до проведення досліджень.

Втрата маси зразка (Δm) визначається за формулою:

$$\Delta m_t = \left[\left(\frac{m_a}{m_k} - 1 \right) \cdot 100 \right], \quad (2)$$

де m_a – маса зразка до випробування, гр; m_k – маса зразка після випробування.

При проведенні досліджень по визначенню групи горючості будівельних матеріалів враховуються вимоги методу експериментального визначення групи горючих будівельних матеріалів, що

дозволяє оцінювати групу горючості будівельних матеріалів для всіх однорідних і шаруватих горючих будівельних матеріалів та таких, що застосовуються як оздоблювальні та облицювальні, а також з фарбовим покриттям. При цьому, виготовляється 12 зразків довжиною 1 000 мм, шириною 190 мм, товщина зразків 70 мм. Випробування проводяться в камері спалювання згідно ДСТУ 8829:2019. Контроль температурного режиму проводили за показаннями термопар (10 шт.), при цьому визначаються такі показники: температура газоподібних продуктів горіння; тривалість самостійного горіння та/або тління; довжина пошкодження зразка; маса зразка до і після випробування.

При визначенні димоутворюючої здатності проводяться дослідження згідно ДСТУ 8829:2019 п. 7.19 «Метод експериментального визначення коефіцієнта димоутворення твердих речовин і матеріалів». Випробування проводяться в камері згорання місткістю $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Для випробування готувались 10 зразків матеріалу розміром $20 \times 20 \text{ мм}$, товщиною до 10 мм. Лакофарбові та плівкові покриття при випробуванні наносилися на алюмінієву фольгу товщиною 0,2 мм. Підготовлені зразки перед випробуванням при температурі $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ витримуються 48 год. Випробування проводяться у двох режимах: у режимі тління і у режимі горіння з використанням газового пальника (довжина полум'я пальника 10–15 мм). У кожному режимі випробуються по п'ять зразків. Коефіцієнт димоутворення (D_m) в $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ обчислюється за формулою:

$$D_m = \frac{V}{L \cdot m} \cdot \ln \frac{T_0}{T_{\min}}, \quad (3)$$

де V – об'єм камери вимірювання, м^3 ; L – довжина шляху променя світла в задимленому середовищі, м; m – маса зразка, кг; T_0 , $T_{\min}$ – відповідно значення початкової та кінцевої світлопроникності, %.

Коефіцієнт димоутворення визначався як середньоарифметичне за результатами

п'яти випробувань.

Визначення індексу поширення полум'я проводяться згідно ДСТУ 8829:2019 7.20 «Метод експериментального визначення індексу поширення полум'я». Для випробування готують 5 зразків досліджуємого матеріалу розміром $320 \pm 2 \text{ мм} \times 140 \pm 2 \text{ мм}$ товщиною до 20 мм. Оздоблювальні та облицювальні матеріали, а також лакофарбові та плівкові покриття випробуються нанесеними на ту саму основу, яка використовується в конструкції. Підготовлені зразки перед випробуванням витримуються при температурі $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 48 год.

Індекс поширення полум'я визначається за формулою:

$$I = \left[\frac{0,0115 \cdot \beta \cdot (t_{\max} - t_0)}{\tau_0} \cdot (\tau_{\max} - \tau_0) \cdot \left(1 + 0,2 \cdot l \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i} \right) \right]^{0,5}, \quad (4)$$

де β – тепловий коефіцієнт установки, визначається за формулою:

$$\beta = \frac{q \cdot Q}{t_1 - t_0}, \quad (5)$$

q – питома теплота згорання газу, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$; Q – витрата газу калібрувального пальника, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$; t_0 – температура горіння в витяжному зонті, $^\circ\text{C}$; t_1 – температура у витяжному зонті, $^\circ\text{C}$; $t_{\max}$ – максимальна температура газоподібних продуктів горіння, $^\circ\text{C}$; l – відстань, на яку поширюється полум'я, мм; τ_0 – початковий час, с; $\tau_{\max}$ – час від початку випробування за досягнення максимальної температури, с; 0,0115 – розмірний коефіцієнт, Вт^{-1} ; 0,2 – розмірний коефіцієнт, $\text{с} \cdot \text{мм}^{-1}$.

При визначенні токсичності продуктів горіння матеріалів дослідження, проводять згідно ДСТУ 8829:2019 п. 7.21 «Метод експериментального визначення показника токсичності продуктів горіння полімерних, синтетичних та інших матеріалів». Оцінювання токсичності компонентів обчислювали за сумарним показником згідно ДСТУ ISO 13344:2018 Визначення

потенціалу летальної токсичності летких продуктів згорання (ISO 13344:2015, IDT) [8]:

$$H_{CL_{50}} = \frac{CL_{50} \cdot CO}{gCO}, \quad (6)$$

де CL_{50} – середня смертельна концентрація оксиду вуглецю, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$; gCO – рівень виділення CO при згоранні умовних «еталонних» матеріалів.

Експериментальне визначення групи займистості матеріалів проводять згідно з ДСТУ Б В.1.1-2-97 (ГОСТ 30402-96) Матеріали будівельні. Метод випробування на займистість. Визначення групи поширення полум'я проводять згідно з ДСТУ Б В.2.7-70-98 Матеріали будівельні. Метод випробування на розповсюдження полум'я (ГОСТ 30444-97) [9; 10].

Визначаються фізико-механічні характеристики вогнезахисних покриттів за стандартними методиками. Нами запропоновано межу міцності при стисканні покриття визначати на зразках – кубах розміром $30 \times 30 \times 30$ мм на гідравлічному пресі з ціною поділки 10 кгс і швидкістю навантаження 20–30 кгс/с, згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками [11].

Адгезійну міцність покриття з поверхню запропоновано визначати по удосконаленій нами методиці з використанням приладу Мії-100 з урахуванням робіт [13–16], згідно якої на зразки $70 \times 30 \times 10$ мм наносять вогнезахисне покриття. Адгезія плівки шару покриття з захисною поверхню визначається методом відриву металевого штамп, приклеєної захисної підложки. Прилад дозволяє визначити адгезію як при нормальних, так і при підвищених температурах. Контроль температури в електропечі проводиться за допомогою термопар та самописця КСП-4. Згідно інструкцій до застосування Мії-100, ціна цифрового барабану лічильника $0,1 \text{ кг/см}^2$ відповідає $0,4266$ кгс тягової сили на захватах. Величина міцності зчеплення при відриві визначається за формулою:

$$R_{\text{відр}} = \frac{n \cdot 0,4266}{0,1 \cdot F}, \quad (7)$$

де $R_{\text{відр}}$ – міцність зчеплення, кгс/см^2 ; n – показання лічильника; F – площа поперечного перерізу, см^2 ; $0,4266$ – тягова сила на захватах, відповідає $0,1 \text{ кгс/см}^2$ показників лічильника.

Для порівняльної оцінки адгезійної міцності нами запропоновано проводити визначення адгезійної міцності неруйнівним методом контролю – велосиметричний метод [12; 13; 16]. Метод оснований на принципі зміни швидкості проходження хвиль при зміні щільності середовища. Різка зниження швидкості на межі захищеної поверхні свідчить про ослаблення контакту, яке чітко фіксується приладами.

Запропонована схема пристрою для контролю кінетики зміни представлена наступним чином: п'єзоелектричний вимірювач ультразвукових коливань встановлюють на внутрішній поверхні, приймальний сигнал аналізує прилад ДУК-20 [13–16] (рис.).

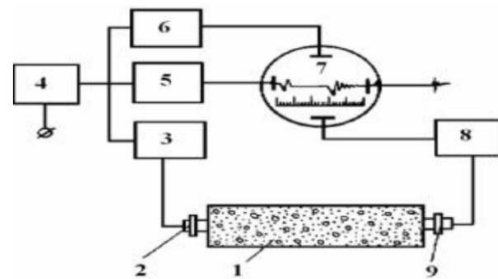


Рис. Блок-схема ультразвукового імпульсного приладу: 1 – бетонний елемент; 2 – випромінювач; 3 – генератор імпульсів; 4 – генератор, що задає; 5 – розгортка, що чекає; 6 – генератор міток часу; 7 – електроннопроменева трубка; 8 – підсилювач; 9 – приймач

Зі зміною контакту покриття на поверхні, що не захищається, відбувається зміна (зменшення) швидкості згинальної хвилі [13–15], згинальні хвилі описуються наступними виразами:

$$p \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{Eh^2}{12(1-\sigma^2)} \Delta u = 0, \quad (8)$$

де t – час; Δ – двовимірний оператор Лапласа; u – зміщення елементів пластини;

ρ – щільність матеріалу; E – модуль Юнга; h – товщина пластини; σ – коефіцієнт Пуассона; ω – швидкість згинальної хвилі частотою:

$$Cu = \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho}}(1 - \sigma^2)\sqrt{\omega} . \quad (9)$$

Принцип дії заснований на вимірі швидкості поширення змін коливань на фіксованій відстані Δl при переміщенні вимірювача приймача вздовж дотичної. По зміні показань вимірника інтервалів можна будувати висновки про дисперсії швидкості поширення хвилі, тобто про наявність порушення адгезії у цьому середовищі. Пристрій дозволяє вимірювати зміну кінетики контакту вогнезахисного покриття з поверхнею, що утворилася в процесі затвердіння покриття та тривалої експлуатації.

Крім того, нами для порівняльного аналізу оцінок зміни адгезійної міцності покриття з поверхнею запропоновано використовувати метод решітчастих та паралельних надрізів ГОСТ 15140-78 Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии (ДСТУ ISO 2409:2015 Фарби та лаки. Випробування методом решітчастих надрізів (ISO 2409:2013, IDT)).

Випробування на спучування покриття проводять в печі муфельної зі швидкістю підйому температури 15–25 °C в хв., а також при вогневому впливі в екстремальних умовах.

При визначенні коефіцієнта спучування покриття проводять виміри висоти покриття до нагрівання (до спучування) h_1 і після нагрівання (після спучування) h_2 . Заміри робили індикатором деформацій з точністю до 0,01 мм. За показник спучування прийнято кратність спучування – відношення висоти спученого шару до його початкового значення.

Товщину вспінювання непрозорого покриття визначають згідно ГОСТ 14644-86 (Детали и изделия из древесины и древесных материалов. Метод определения толщины непрозрачных покрытий), прозорого по ГОСТ 13639-75 (Детали и изделия из древесины и древесных

материалов. Метод определения толщины прозрачных лаковых покрытий), маятниковий вимірювач МТЗОИ по ТУ 25-06-1786-79 (Магнитные толщинометры типа МТЗН) [18; 19].

Враховуючи особливе значення при застосуванні вогнезахисних композицій, нами були проведені дослідження технологічних властивостей складів на стадії їх підготовки та нанесення на захищувану поверхню. До основних фізико-механічних властивостей, які визначають технологічність застосування композицій, є: в'язкість, розтікання, укривання поверхні, час затвердіння та інші.

При визначенні основних властивостей захисних складів та композицій та затвердлених покриттів використовувалися різні стандартні та відомі методи дослідження: ГОСТ 5802-86 Растворы строительные. Методы испытаний (ДСТУ Б В.2.7-239:2010 Будівельні матеріали. Розчини будівельні. Методи випробувань (EN 1015-11:1999, NEQ)), ГОСТ 20501-75. Клеи для древесины. Методы определения технологических характеристик, ГОСТ 8420-74 Материалы лакокрасочные. Методы определения условной в'язкости (ДСТУ ISO 2431:2015 Фарби та лаки. Визначення часу витікання з використанням лійок (ISO 2431:2011, IDT)), ГОСТ 19007-73. Материалы лакокрасочные. Метод определения времени и степени высыхания (ДСТУ ISO 9117-1:2015 Фарби та лаки. Контроль висихання. Частина 1. Визначення стану та часу повного висихання (ISO 9117-1:2009, IDT)), ГОСТ 15140-78. Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии (ДСТУ ISO 2409:2015 Краски и лаки. Испытания методом решетчатых надрезов (ISO 2409:2013, IDT)), ДСТУ ISO 2431:2015 Фарби та лаки. Визначення часу витікання з використанням лійок (ISO 2431:2011, IDT), ДСТУ Б В.2.7-239:2010 Будівельні матеріали. Розчини будівельні. Методи випробувань (EN 1015-11:1999, NEQ) [20; 21].

Враховуючи необхідність визначення стійкості покриттів впродовж визначеного часу експлуатації, проводяться дослідження

згідно ГОСТ 9.401-91 ЄСЗКС. Покриття лакофарбові. Загальні вимоги і методи прискорення випробувань на стійкість до дії кліматичних чинників (ДСТУ ISO 6270-2:2015 Фарби та лаки. Визначення вологостійкості. Частина 2. Випробування зразків в атмосфері конденсації води (ISO 6270-2:2005, IDT)).

Висновки

На основі проведеного аналізу розроблені основні науково – методичні підходи визначення пожежно-технічних, фізико-механічних та технологічних властивостей вогнезахисних покриттів, які дозволяють оцінити пожежну небезпеку будівельних матеріалів та конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Arnauet P., Ehm H., Kruppa J. Essais d'incendies naturels. *Construction Metalliques*. 1974. № 3. Pp. 5–17.
2. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація.
3. ДСТУ EN ISO 1716:2023. Випробування будівельних виробів щодо реакції на вогонь.
4. ДСТУ EN ISO 1182:2022. Випробування будівельних виробів щодо реакції на вогонь. Випробування на негорючість (EN ISO 1182:2020, IDT; ISO 1182:2020, IDT).
5. ДСТУ EN ISO 4589-1:2018. Пластмаси. Визначення характеристик горіння за кисневим індексом. Частина 1. Загальні вимоги (EN ISO 4589-1:2017, IDT; ISO 4589-1:2017, IDT).
6. ДСТУ EN ISO 4589-2:2018. Пластмаси. Визначення характеристик горіння за кисневим індексом. Частина 2. Випробування за температури навколишнього середовища (EN ISO 4589-2:2017, IDT; ISO 4589-2:2017, IDT).
7. ДСТУ EN ISO 4589-3:2018. Пластмаси. Визначення характеристик горіння за кисневим індексом. Частина 3. Випробування за підвищеної температури (EN ISO 4589-3:2017, IDT; ISO 4589-3:2017, IDT).
8. ДСТУ ISO 13344:2018. Визначення потенціалу летальної токсичності легких продуктів згоряння (ISO 13344:2015, IDT).
9. ДСТУ Б В.1.1-2-97 (ГОСТ 30402-96). Матеріали будівельні. Метод випробування на займистість.
10. ДСТУ Б В.2.7-70-98 (ГОСТ 30444-97). Матеріали будівельні. Метод випробування на розповсюдження полум'я.
11. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками.
12. Беликов А. С. Методика экспериментального определения огнестойкости строительных конструкций, группы труднгорючих и горючих твердых материалов. *Вісник ПДАБА*. 1997. № 3. С. 21–28.
13. Беликов А. С. Оценка адгезионной прочности огнезащитного покрытия. *Проблемы пожарной безопасности*. 1999. Вып. 3. С. 40–46.
14. Жартовский В. М., Рагимов С. Ю. Современное состояние разработок в области огнезащитных покрытий. *Проблемы огнезащиты строительных конструкций*. 1994. С. 31–32.
15. Методика проведения опытно-промышленных испытаний огнезащитных составов на шахтах п/о «Укрзападуголь». Донецк : ВНПО «Респиратор», 1997. 15 с.
16. Беликов А. С., Крикунов Г. Н., Чалый В. Г., Шаломов В. А. Методика исследования огнезащитных покрытий. *Сборник научных трудов Приднестровской государственной академии строительства и архитектуры*. Вып. 2, ч. 1. Днепропетровск, 1997. С. 83–86.
17. ГОСТ 14644-86. Детали и изделия из древесины и древесных материалов. Метод определения толщины непрозрачных покрытий.
18. ТУ 25-06-1786-79. Магнитные толщинометры типа МТЗН).
19. ГОСТ 20501-75. Клеи для древесины. Методы определения технологических характеристик.
20. ДСТУ ISO 2431:2015. Фарби та лаки. Визначення часу витікання з використанням лійок (ISO 2431:2011, IDT).
21. ДСТУ Б В.2.7-239:2010. Будівельні матеріали. Розчини будівельні. Методи випробувань (EN 1015-11:1999, NEQ).

REFERENCES

1. Arnauet P., Ehm H. and Kruppa J. Essais d'incendies naturels. *Construction Metalliques*. 1974, no. 3, pp. 5–17.
2. DSTU 8829:2019. *Pozhezhovybukhonebezpechnist rechovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennia. Klasyfikatsiia* [Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods of their determination. Classification]. (in Ukrainian).

3. DSTU EN ISO 1716:2023. *Vyprobuvannia budivelnykh vyrobiv shchodo reaktsii na vohon* [Testing of building products for reaction to fire]. (in Ukrainian).
4. DSTU EN ISO 1182:2022. *Vyprobuvannia budivelnykh vyrobiv shchodo reaktsii na vohon. Vyprobuvannia na nehorichnist (EN ISO 1182:2020, IDT; ISO 1182:2020, IDT)* [Testing of building products for reaction to fire. Non-flammability test (EN ISO 1182:2020, IDT; ISO 1182:2020, IDT)]. (in Ukrainian).
5. DSTU EN ISO 4589-1:2018. *Plastmasy. Vyznachennia kharakterystyk horinnia za kysnevym indeksom. Chastyna 1. Zahalni vymohy (EN ISO 4589-1:2017, IDT; ISO 4589-1:2017, IDT)* [DSTU EN ISO 4589-1:2018 Plastics. Determination of burning characteristics by oxygen index. Part 1. General requirements (EN ISO 4589-1:2017, IDT; ISO 4589-1:2017, IDT)]. (in Ukrainian).
6. DSTU EN ISO 4589-2:2018. *Plastmasy. Vyznachennia kharakterystyk horinnia za kysnevym indeksom. Chastyna 2. Vyprobuvannia za temperatury navkolyshnoho seredovyshcha (EN ISO 4589-2:2017, IDT; ISO 4589-2:2017, IDT)* [DSTU EN ISO 4589-2:2018 Plastics. Determination of burning characteristics by oxygen index. Part 2. Tests at ambient temperature (EN ISO 4589-2:2017, IDT; ISO 4589-2:2017, IDT)]. (in Ukrainian).
7. DSTU EN ISO 4589-3:2018. *Plastmasy. Vyznachennia kharakterystyk horinnia za kysnevym indeksom. Chastyna 3. Vyprobuvannia za pidvyshchenoi temperatury (EN ISO 4589-3:2017, IDT; ISO 4589-3:2017, IDT)* [DSTU EN ISO 4589-3:2018 Plastics. Determination of burning characteristics by oxygen index. Part 3. Test at elevated temperature (EN ISO 4589-3:2017, IDT; ISO 4589-3:2017, IDT)]. (in Ukrainian).
8. DSTU ISO 13344:2018. *Vyznachennia potentsialu letalnoi toksychnosti lehkykh produktiv zghoriannia* [Determination of the lethal toxicity potential of light combustion products] (ISO 13344:2015, IDT). (in Ukrainian).
9. DSTU B V.1.1-2-97 (HOST 30402-96). *Materialy budivelni. Metod vyprobuvannia na zaimystist* [DSTU B V.1.1-2-97 (GOST 30402-96) Building materials. Flammability test method]. (in Ukrainian).
10. DSTU B V.2.7-70-98 (HOST 30444-97). *Materialy budivelni. Metod vyprobuvannia na rozpovsiudzhennia polum'ia* [DSTU B V.2.7-70-98 (GOST 30444-97) Building materials. Flame spread test method]. (in Ukrainian).
11. DSTU B V.2.7-214:2009. *Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia mitsnosti za kontrolnymy zrazkami* [DSTU B V.2.7-214:2009 Building materials. Concretes. Methods for determining strength using control samples]. (in Ukrainian).
12. Belykov A.S. *Metodyka eksperymentalnoho opredeleniya ohnestoikosti stroytelnykh konstruktsiy, hruppu trudnohorichykh y horichykh tverdukh materialov* [Methods of experimental determination of fire resistance of building structures, groups of hard-to-burn and combustible solid materials]. *Visnyk PDABA* [Bulletin of PSACEA]. 1997, no. 3, pp. 21–28. (in Russian).
13. Belykov A.S. *Otsenka adhezyonnoi prochnosti ohnezashchytnoho pokrutya* [Evaluation of the adhesion strength of the fire-resistant coating]. *Problemy pozharnoi bezopasnosti* [Problems of Fire Safety]. 1999, vol. 3, pp. 40–46. (in Russian).
14. Zhartovskiy V.M. and Rahymov S.Yu. *Sovremennoe sostoyaniye razrabotok v oblasti ohnezashchytnykh pokrutyi* [The current state of development in the field of fire-resistant coatings]. *Problemy ohnezashchyty stroytelnykh konstruktsiy* [Problems of Fire Protection of Construction Structures]. 1994, pp. 31–32. (in Russian).
15. *Metodyka provedeniya oputno-promushlennnykh yspytaniy ohnezashchytnykh sostavov na shakhtakh p/o "Ukrzapaduhol"* [Methodology of experimental and industrial tests of fire-resistant compounds in mines p/o "Ukrzapaduhol"]. Donetsk: VNPO "Respyrator" Publ., 1997, 15 p. (in Russian).
16. Belykov A.S., Krykunov H.N., Chalui V.H. and Shalomov V.A. *Metodyka yssledovaniya ohnezashchytnykh pokrutyi* [The method of research of fire-resistant covers]. *Sbornik nauchnykh trudov Prydneprovskoy gosudarstvennoy akademii stroitel'stva i arkhitektury* [Collection of Scientific Works of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnepropetrovsk, 1997, vol. 2, part 1, pp. 83–86. (in Russian).
17. *HOST 14644-86. Detaly y yzdelyia yz drevesynu y drevesnykh materialov. Metod opredeleniya tolshchynu neprozrachnykh pokrutyi* [GOST 14644-86. Details and products from wood and wood materials. The method of determining the thickness of opaque covered]. (in Russian).
18. *TU 25-06-1786-79. Mahnytnue tolshynometru tipa MTZN* [Magnetic thickness gauges of the MTZN type]. (in Russian).
19. *HOST 20501-75. Kley dlia drevesynu. Metodu opredeleniya tekhnologicheskyykh kharakterystyk* [GOST 20501-75. Adhesives for wood. Methods of determining technological characteristics]. (in Russian).
20. DSTU ISO 2431:2015. *Farby ta laky. Vyznachennia chasu vytikannia z vykorystanniam liiok (ISO 2431:2011, IDT)* [DSTU ISO 2431:2015. Paints and varnishes. Determination of flow time using funnels (ISO 2431:2011, IDT)]. (in Ukrainian).
21. DSTU B V.2.7-239:2010. *Budivelni materialy. Rozchyny budivelni. Metody vyprobuvan (EN 1015-11:1999, NEQ)* [DSTU B V.2.7-239:2010. Building materials. Mortars for construction. Test methods (EN 1015-11:1999, NEQ)]. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.02.2025.

УДК 519.6:629.76

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.33.1141

ПРОГНОЗУВАННЯ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ У ВЕНТИЛЬОВАНОМУ ОБ'ЄМІ ЗІ СКЛАДНОЮ ГЕОМЕТРІЄЮ

БІЛЯЄВ М. М.¹, докт. техн. наук, проф.,
БІЛЯЄВА В. В.², докт. техн. наук, проф.,
БЕРЛОВ О. В.^{3*}, канд. техн. наук, доц.,
КОЗАЧИНА В. А.⁴, канд. техн. наук, доц.,
СЕМЕНЕНКО П. В.⁵, канд. техн. наук, доц.

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

² Кафедра енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський металургійний інститут», пр. Науки, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-98-22, e-mail: y.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

^{3*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

⁴ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту», вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: v.kozachyna@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁵ Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», вул. Криворізька, 3, 49008, Дніпро Україна, тел. +38 (056) 372-00-22, e-mail: semenenkopv1981@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0447-5591

Анотація. Постановка проблеми. На етапі передстартової підготовки необхідно виконати дуже жорсткі умови щодо умов навколишнього середовища всередині головного обтічника, де знаходиться супутник. А саме, дуже важливо передбачити концентрацію пилу всередині головного обтічника та біля поверхонь супутника під час примусової вентиляції. Тому виникає важлива задача – прогнозування рівня пилового забруднення повітря всередині обтічника та визначення ступеню забруднення особливо «чутливих» поверхонь. Для адекватного рішення даної задачі потрібно мати науково обґрунтовані математичні моделі. **Мета роботи.** Розробка швидкорозрахункової чисельної моделі для прогнозування пилового забруднення об'єму обтічника на етапі передстартової підготовки. **Методика.** Для прогнозування пилового режиму головного обтічника ракети-носія розроблена чисельна модель. Моделюючи рівняння: рівняння масопереносу пилу (враховує перенос пилу за рахунок конвекції, дифузії та гравітаційного осадження), рівняння для потенціалу швидкості (визначення поля швидкості повітряного потоку при обтіканні супутника в головному обтічнику), емпіричні залежності, що допомагають визначити інтенсивність осадження пилу на поверхню супутника. **Наукова новизна.** Розроблена багатофакторна чисельна модель для аналізу пилового забруднення обтічника при примусовій його вентиляції на етапі термостатування. Модель дає можливість здійснювати рішення задачі аеродинаміки та масопереносу в областях, що мають складну геометричну форму. Для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь використані кінцево-різницеві схеми. **Практична значущість.** Розроблена чисельна модель дає можливість швидко визначати рівень пилового забруднення як в самому обтічнику так і зонах розташування особливо «чутливих» поверхонь супутника. **Висновки.** На основі запропонованої чисельної моделі розроблено комп'ютерний код. Представлено результати обчислювальних експериментів для оцінки поля концентрації пилу всередині головного обтічника ракети-носія.

Ключові слова: пилове забруднення; супутник; транспортний відсік; головний обтічник; математичне моделювання

FORECASTING DUST AIR POLLUTION IN A VENTILATED VOLUME WITH COMPLEX GEOMETRY

BILIAIEV M.M.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
BILIAIEVA V.V.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
BERLOV O.V.^{3*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
KOZACHYNA V.A.⁴, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

SEMENENKO P.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

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

² Department of Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and technologies, ESI “Dnipro Metallurgical Institute”, 4, Science Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 374-98-22, e-mail: v.v.biliaieva@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

^{3*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

⁴ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Dnipro Institute of Infrastructure and Transport”, 2, Lazaryan St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: v.kozachyna@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁵ Yuzhnoye State Design Office, 3, Krivorozhskaya St., Dnipro, 49008, Ukraine, tel. +38 (056) 372-00-22, e-mail: semenenkopv1981@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0447-5591

Abstract. Problem statement. At the stage of pre-launch preparation, it is necessary to fulfill very strict conditions regarding the environmental conditions inside the main fairing, where the satellite is located. Namely, it is very important to predict the concentration of dust inside the main fairing and near the surfaces of the satellite during forced ventilation. Therefore, an important task arises – predicting the level of dust pollution of the air inside the fairing and determining the degree of pollution of especially “sensitive” surfaces. To adequately solve this problem, it is necessary to have scientifically based mathematical models. **The purpose of the article.** Development of a fast-calculating numerical model for predicting dust contamination of the fairing volume at the pre-launch preparation stage. **Methodology.** A numerical model has been developed to predict the dust regime of the main fairing of the launch vehicle. Modeling equations: dust mass transfer equation (takes into account dust transport due to convection, diffusion and gravitational deposition), equation for the velocity potential (determination of the air flow velocity field when flowing around the satellite in the main fairing), empirical dependencies that help determine the intensity of dust deposition on the satellite surface. **Scientific novelty.** A multifactorial numerical model has been developed for the analysis of dust contamination of the fairing during its forced ventilation at the stage of thermostating. The model makes it possible to solve the problem of aerodynamics and mass transfer in areas with a complex geometric shape. Finite-difference schemes are used for the numerical integration of the modeling equations. **Practical significance.** The developed numerical model makes it possible to quickly determine the level of dust contamination both in the fairing itself and in the areas of particularly “sensitive” surfaces of the satellite. **Conclusions.** Based on the proposed numerical model, a computer code has been developed. The results of computational experiments to estimate the dust concentration field inside the main fairing of a launch vehicle are presented.

Keywords: dust pollution; satellite; transport compartment; main fairing; mathematical modeling

Постановка проблеми. Головний обтічник ракети-носія є конструктивним елементом, де розташовується супутник (рис. 1). Термостатування об'єму головного обтічника є дуже важливою процедурою на етапі передстартової підготовки ракети-носія [1–12]. Тривале термостатування повітря вимагає дуже «жорстких» умов чистоти повітря всередині головного обтічника. Тривала вентиляція може призвести до забруднення пилом чутливих поверхонь супутника. Особливо чутливими поверхнями супутника є :

- сонячні батареї;
- оптичні інструменти;
- рефлектори передавачів сигналів;
- чутливі сенсорні елементи.

Тому, важливим, практичним завданням є прогнозування рівня пилового

забруднення супутника всередині головного обтічника під час його примусової вентиляції для визначення зон, де може бути небезпечне накопичення пилу.



Рис. 1. Головний обтічник [<https://cutt.ly/uetrDluX>]

Для рішення цієї проблеми важливо використання математичних моделей [1; 2; 10], тому що проведення експерименту для реального об'єкту практично неможливо. Це пов'язано з тим, що власник супутника не дозволяє «втручання» в середину обтічника (внесення якісь додаткових детекторів, вимірювальної апаратури тощо), коли супутник вже встановлено у ньому. Тому, створення науково обґрунтованих математичних моделей для прогнозування пилового режиму всередині обтічника є важливою прикладною задачею.

Мета статті – розробка швидкорозрахункової чисельної моделі для прогнозування пилового забруднення об'єму обтічника на етапі передстартової підготовки.

Методика. Для визначення концентрації пилу в головному обтічнику під час примусової вентиляції необхідно послідовно вирішити наступні задачі:

1. Розрахувати поле швидкостей повітряного потоку в головному обтічнику.
2. Розрахувати поле концентрації пилу в головному обтічнику.
3. Розрахуйте кількість частинок пилу, які осядуть на «чутливій» поверхні.

Складність вирішення цих завдань полягає в тому, що необхідно проводити розрахунки в області зі складною геометрією.

Для оцінки поля швидкостей у головному обтічнику під час його примусової вентиляції на передстартовому етапі було використано модель потенційного руху [1; 11]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

де P – потенціал швидкості повітряного потоку.

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку визначаються на основі залежностей (2):

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (2)$$

Граничні умови для рівняння (1) наступні:

$$1. \frac{\partial P}{\partial x} = V_{in} \text{ – на вхідній границі (} V_{in} \text{ –}$$

відома швидкість потоку повітря на цій границі).

$$2. P + \text{Const} \text{ – на межі виходу.}$$

$$3. \frac{\partial P}{\partial n} = 0 \text{ – є зовнішньою нормаллю до}$$

твердої поверхні.

Для прогнозування рівня пилового забруднення головного обтічника ракетно-носія під час процедури примусової вентиляції було використано рівняння переносу пилових частинок [1; 11]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

де C – концентрація пилу; u, v – компоненти вектору швидкості повітря в головному обтічнику; t – час; μ_x, μ_y – коефіцієнти дифузії.

Граничні умови для рівняння (3) наступні:

1. На вході в головний обтічник: $C = C_{(in)}$, де $C_{(in)}$ – відома концентрація пилу.

2. На виході повітря з головного обтічника: $C_{ij} = C_{(out)}$, де $C_{(out)}$ – концентрація пилу в останній комірці; $C_{(ij)}$ – концентрація пилу в передостанній комірці.

3. На твердих поверхнях головного обтічника і підлоги супутника:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

де n – одинична нормаль до поверхні.

Початкові умови $t = 0$ наступні: $C = C_0$, де C_0 – відома концентрація пилу в головному обтічнику. Коефіцієнти дифузії визначалися наступним чином:

$$\mu_x = k_0 \cdot u, \mu_y = k_0 \cdot v, k_0 = 0,1.$$

Для розв'язання задачі аеродинаміки рівняння (1) було зведено до вигляду:

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

де t – фіктивний час.

Перед розв'язанням рівняння (4) необхідно задати початкову умову для фіктивного часу, наприклад, $P = 0$ для $t = 0$.

Далі для розв'язання рівняння (4) було використана схема умовної апроксимації. На першому кроці розв'язувалося наступне рівняння:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right].$$

На кожному кроці невідоме значення концентрації домішки визначається за допомогою методу біжучого рахунку, тобто за явною формулою.

На другому кроці розв'язувалося наступне рівняння:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

На кожному кроці невідоме значення концентрації домішки визначається за допомогою методу біжучого рахунку, тобто за явною формулою.

Значення потенціалу швидкості на кожному кроці визначалося за явною формулою на кожному кроці. Розрахунок закінчується, коли виконується наступна умова:

$$|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n| \leq \varepsilon,$$

де ε – мале число. У розрахунках було прийнято $\varepsilon = 0,01$; n – номер ітерації.

Далі були розраховані компоненти швидкості повітряного потоку за наступними формулами:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Для чисельного розв'язання рівняння переносу пилу в обтічнику використовується схема розщеплення. Для побудови схеми здійснювалося таке фізичне розщеплення рівняння масопереносу:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right).$$

Перше рівняння із цієї системи – це рівняння конвективного переносу, друге рівняння – рівняння дифузії.

При чисельному інтегруванні рівняння конвективного переносу використовуються такі залежності:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2},$$

$$v^+ = \frac{v + |v|}{2}, \quad v^- = \frac{v - |v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

Схема розщеплення для рівняння конвективного переносу записується так:

– на першому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k + L_y^+ C^k = 0;$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} = 0.$$

Невідоме значення C у кожному рівнянні визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного інтегрування рівняння дифузії використовується двоетапна різницева схема розщеплення, яка має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Концентрація пилу в даних рівняннях визначалася за явною формулою.

Для розрахунку кількості частинок пилу, які мають розмір більше 5 мкм і падають на горизонтальну поверхню, була використана емпірична модель [9]:

$$C_s = c \cdot p \cdot C_n^{0.773} t,$$

де $c = 1,076$ – емпіричний коефіцієнт, t – час, $p = 2,851$ – емпіричний коефіцієнт [9]; C_n – концентрація пилу в повітрі поблизу чутливої поверхні.

На основі розглянутої чисельної моделі створено код, мова програмування – FORTRAN.

Результати. Нижче представлено результати чисельних експериментів, які були проведені з використанням розроблених чисельних моделей. Обчислювальні експерименти проводилися для супутників всередині головного обтічника ракети-носія CYCLONE-IV. Розглянуто два випадки, коли супутник, що розташований всередині обтічника, має складну геометричну форму (рис. 2, 3). Розміри головного обтічника цієї ракети-носія становили 4,99×4 м (двовимірний модель). На верхній межі розрахункової області задавався рівномірний потік повітря зі швидкістю 2 м/с. Діаметр частинок пилу, які потрапляють в основний обтічник, становив 7 мкм. Концентрація пилу в потоці повітря, який використовувався для примусової вентиляції, становила 2 000 частинок/м³. «Чутливі» поверхні для кожного сценарію показані ділянкою А–В на рисунках 2, 3.

Результати чисельного експерименту наведені на рисунках 4, 5. На цих рисунках концентрація показана в безрозмірному вигляді: кожне число на цих рисунках показує концентрацію у відсотках від максимальної концентрації $C_{\max}$ в розрахунковій області.

Результати чисельного експерименту показують, що геометрична форма супутника суттєво впливає на розподіл пилу всередині головного обтічника. Зона інтенсивного пилового забруднення, для обох сценаріїв, формується у верхній частині супутника, тобто біля отвору крізь який потрапляє повітря всередину обтічника. Це обумовлено різким гальмуванням повітряного потоку коли він взаємодіє зі супутником.

Кількість частинок пилу, які потрапляють на чутливі поверхні на протязі 1 доби (область А–В, рис. 2, 3), показано в таблиці.

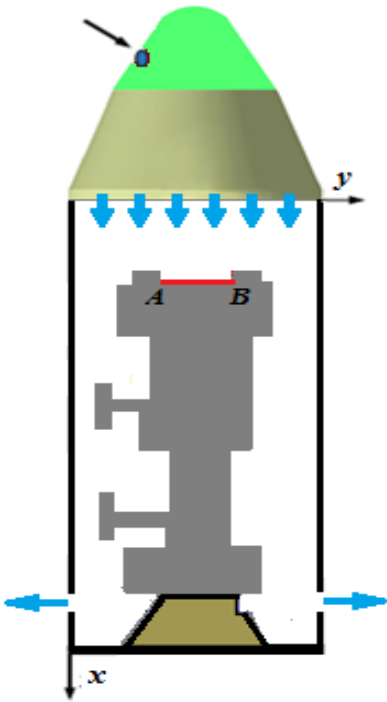


Рис. 2. Схема розрахункової області (сценарій № 1)

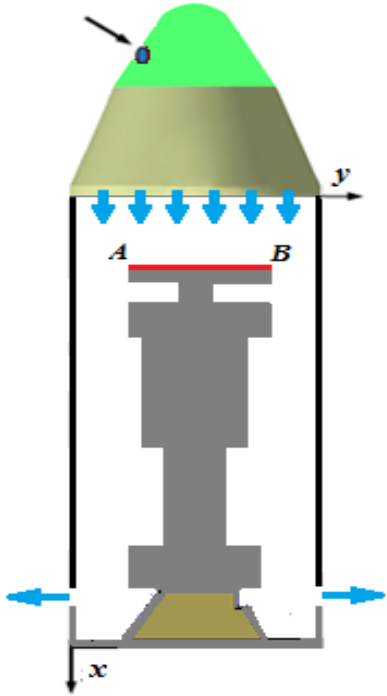


Рис. 3. Схема розрахункової області (сценарій № 2)

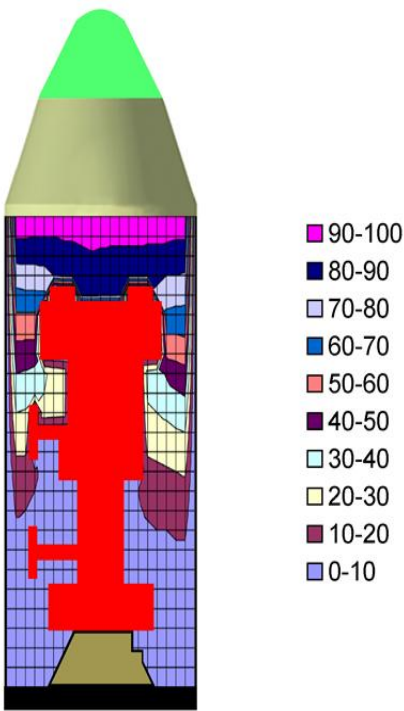


Рис. 4. Поле безрозмірної концентрації пилу в головному обтічнику (сценарій № 1), $C_{max} = 2\,000$

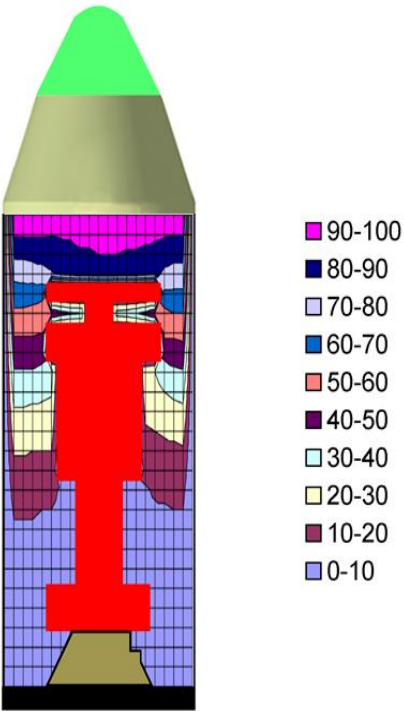


Рис. 5. Поле безрозмірної концентрації пилу в головному обтічнику (сценарій № 2)

Таблиця

Кількість частинок, які осідають на чутливій поверхні

Сценарій № 1	Сценарій № 2
252 частинок	351 частинок

Результати з таблиці показують, що для сценарію № 2 буде спостерігатися інтенсивне пилове забруднення чутливої поверхні. Це пов'язано з тим, що дана поверхня має більший розмір ніж «чутлива» поверхня для сценарію № 1.

Варто зазначити, що час обчислень склав 6 с.

Наукова новизна та практична цінність. Розроблена багатфакторна чисельна модель для аналізу пилового забруднення обтічника при примусовій його вентиляції на етапі термостатування. Модель дає можливість здійснювати рішення задачі аеродинаміки та масопереносу в областях, що мають складну геометричну форму. Для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь

використані кінцево-різницеві схеми.

Висновки

1. Розроблено швидкодіючу чисельну модель для прогнозування пилового забруднення головного обтічника ракети-носія під час його примусової вентиляції. Запропонована чисельна модель дозволяє врахувати основні фізичні фактори, які впливають на розподіл пилу в головному обтічнику під час примусової вентиляції.

2. Розроблена комп'ютерна програма дозволяє проводити обчислювальні розрахунки за короткий час. Ця комп'ютерна програма може бути використана для первинної оцінки пилового режиму в головному обтічнику на етапі його примусової вентиляції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Біляєв М., Біляєва В., Русакова Т., Козачина В., Берлов О., Семененко П., Козачина В., Бразалук І., Клим В., Татарко Л. Розробка методу оцінки запиленості повітря в головному обтічнику ракети-носія. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2022. № 5/1 (119). С. 17–25.
2. Francisco J. T. Вентиляція відсіків. Критерії проектування космічних апаратів. NASA-SP-8060. 1970, 31 p. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19710018690>
3. Посібник користувача Falcon. *Space Exploration Technologies Corp*. URL: <https://cutt.ly/WettMMly>
4. Кашанов А. Е., Дегтярьов А. В., Гладкий Е. Г., Баранов Є. Ю. Оцінка технічних ризиків при пуску ракети-носія «Дніпро». *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2012. № 5 (92). С. 113–117.
5. Посібник користувача ракети-носія Ariane 5. 2016. URL: https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2011/07/Ariane5Users-Manual_October2016.pdf.
6. Налласамі Р., Кандула М., Дансіл Л., Шалхорн П. Тривимірне поле течії в масштабованій моделі корисного навантаження обтічника ракети-носія. *38-а конференція і виставка з гідродинаміки*. Вашингтон, 2008. С. 1–21.
7. Триббл А. К., Бояджан Б., Девіс Д. та ін. Керівництво з інженерного проектування контролю забруднення аерокосмічного співтовариства. NASA. 1996. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960044619/downloads/19960044619.pdf>
8. Булавка С.С. Результати експериментальних досліджень удосконаленої системи термостатування повітря ракет-носіїв. *Наукові нотатки*. 2021. № 71. С. 9–15.
9. Ванхове Е., Тонду Т., Руссель Ж. Ф., Фей Д., Гіге П. Кількісний та якісний моніторинг молекулярного забруднення в реальному часі. *Журнал космічних апаратів і ракет*. 2016. № 53 (6). С. 1166–1171.
10. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.
11. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O. & Semenenko P. Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle. *26th International Scientific Conference Transport Means*. 2022. Pp. 122–127.
12. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Mashykhina P. & Rusakova K. Predicting Dust Pollution in the Passenger Compartment. *26th International Scientific Conference Transport Means*. 2022. Pp. 206–211.

REFERENCES

1. Biliaiev M., Biliaieva V., Rusakova T., Kozachyna V., Berlov O., Semenenko P., Kozachyna V., Brazaluk I., Klym V. and Tatarko L. *Rozrobka metodu otsinky zapylenosti povitrya v holovnomu obtichnyku rakety-nosiya* [Developing method for assessment air dustiness in the main fairing the launch vehicle]. *Skhidno-Yevropeys'ky zhurnal peredovykh tekhnolohiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. 2022, vol. 5 (1 (119)), pp. 17–25. (in Ukrainian).
2. Francisco J.T. Compartment venting. NASA space vehicle design criteria. NASA. 1970. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19710018690> (in Ukrainian).

3. *Posibnyk korystuvacha Falcon* [Falcon User's Guide]. Space Exploration Technologies Corp. 2021. URL: <http://www.spacex.com/media/falcon-users-guide-2021-09.pdf> (in Ukrainian).
4. Kashanov A.E., Dehtiarev A.V., Hladkyi E.H. and Baranov E.Iu. *Otsinka tekhnichnykh ryzykiv pry pusku rakety-nosiya "Dnipro"* [Assessment of technical risks during the launch of the Dnipro launch vehicle]. *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya* [Aerospace Engineering and Technology]. 2012, no. 5 (92), pp. 113–117. (in Ukrainian).
5. *Posibnyk korystuvacha rakety-nosiya Ariane 5* [Ariane 5: User's Manual. Arianespace]. 2016. URL: https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2011/07/Ariane5_Users-Manual_October2016.pdf (in Ukrainian).
6. Nallasamy R., Kandula M., Duncil L. and Schallhorn P. *Tryvymirne pole techiyi v masshtabovaniy modeli korysnoho navantazhennya obtichnyka rakety-nosiya* [Three-Dimensional Flowfield in the Scaled Payload Fairing Model of an Expendable Launch Vehicle]. *38-a konferentsiya i vystavka z hidrodynamiky* [38th Fluid Dynamics Conference and Exhibit]. Vashington, 2008, pp. 1–21. (in Ukrainian).
7. Tribble A.C., Boyadjan B., Davis J. et. al. *Kerivnystvo z inzhenerneho proektuvannya kontrolyu zabrudnennya aerokosmichnoho spivtovarystva* [Contamination Control Engineering Design Guidelines the Aerospace Community]. NASA, 1996. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960044619/downloads/19960044619.pdf> (in Ukrainian).
8. Bulavka S.S. *Rezultaty eksperymental'nykh doslidzhen' udoskonalenoyi systemy termostatuвання povitrya raket-nosiyiv* [Results of experimental studies of the improved air thermostating system of launch vehicles]. *Naukovi notatky* [Scientific Notes]. 2021, no. 71, pp. 9–15. (in Ukrainian).
9. Vanhove E., Tondou T., Roussel J.F., Faye D. and Guigue P. *Kil'kisnyy ta yakisnyy monitorynh molekulyarnoho zabrudnennya v real'nomu chasi* [Real-time quantitative and qualitative monitoring of molecular pollution]. *Zhurnal kosmichnykh aparativ i raket* [Journal of Spacecraft and Rockets]. 2016, no. 6 (53), pp. 1166–1171. (in Ukrainian).
10. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khrutch V.K. and Biliaiev M.M. *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayuschey srede* [Numerical simulation of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).
11. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O. and Semenenko P. Analysis of Temperature Field in the Transport Compartment of the Launch Vehicle. 26th International Scientific Conference Transport Means. 2022, pp. 122–127.
12. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaieva V., Mashykhina P. and Rusakova K. Predicting Dust Pollution in the Passenger Compartment. 26th International Scientific Conference Transport Means. 2022, pp. 206–211.

Надійшла до редакції: 01.03.2025.

УДК 624.012.45:620.197.6

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.41.1142

ВПЛИВ МІНЕРАЛЬНИХ ОЛИВ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ СТИСНУТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

ЄРМАКОВ О. М.^{1*}, асп.,

ВОЛКОВА В. Є.², докт. техн. наук, проф.

^{1*} Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва і архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 712-09-48, e-mail: Aleksv@ukr.net, ORCID ID: 0009-0005-1581-1230

² Кафедра цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, 49009, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 561-55-62, e-mail: drvev09@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1883-1385

Анотація. Постановка проблеми. Залізобетонні елементи широко використовуються у сучасному будівництві завдяки їхнім винятковим механічним характеристикам, таким як міцність і тривала експлуатаційна стійкість. Однак під впливом агресивних середовищ, до яких належать промислові мастила і мінеральні оливи, їхня несуча здатність може істотно погіршуватися. Проникаючи в пористу структуру бетону, оливи змінюють його фізико-хімічні властивості, що негативно позначається на міцності та здатності витримувати механічні навантаження. Оскільки на багатьох промислових об'єктах залізобетон постійно контактує з мінеральними оливами, виникає нагальна потреба у всебічному вивченні їхнього впливу на залізобетон. **Мета.** Огляд сучасних наукових досліджень і теоретичних підходів до оцінки впливу мінеральних олив на несучу здатність стиснутих залізобетонних елементів. У статті розглянуто результати досліджень, що підтверджують вплив олив на корозійні процеси та тріщиноутворення в залізобетоні, а також наведено рекомендації щодо застосування захисних заходів для підвищення довговічності конструкцій. **Висновок.** Огляд наукових джерел свідчить, що оливи відіграють важливу роль у промислових процесах, однак їх тривалий контакт із залізобетонними конструкціями може призвести до значного зниження несучої здатності. Результати наукових досліджень підтверджують необхідність подальшого вивчення цього явища та розробки заходів захисту, спрямованих на мінімізацію негативних наслідків від впливу мінеральних олив.

Ключові слова: мінеральні оливи; залізобетон; несуча здатність; корозія; бетон

THE IMPACT OF MINERAL OILS ON THE LOAD-BEARING CAPACITY OF COMPRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

YERMAKOV O.M.^{1*}, Postgrad. Stud.,

VOLKOVA V.Ye.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.

^{1*} 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) 712-09-48, e-mail: Aleksv@ukr.net, ORCID ID: 0009-0005-1581-1230

² Department of Civil Engineering, Construction Technologies and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian and Economic University, 25, Serhiy Efremov St., Dnipro, 49009, Ukraine, tel. +38 (050) 561-55-62, e-mail: drvev09@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1883-1385

Abstract. Statement of problem. Reinforced concrete elements are widely used in modern construction due to their exceptional mechanical characteristics, such as strength and long-term operational stability. However, under the influence of aggressive environments, including industrial lubricants and mineral oils, their load-bearing capacity can significantly deteriorate. Oils penetrate the porous structure of concrete, altering its physical and chemical properties, which negatively affects the material's strength and its ability to withstand mechanical loads. Since reinforced concrete in many industrial facilities is in permanent contact with mineral oils, there is an urgent need for a comprehensive study of their impact on concrete and reinforced concrete elements. **Purpose.** The aim is to review current scientific research and theoretical approaches to assess the impact of mineral oils on the load-bearing capacity of compressed reinforced concrete elements. The article reviews research findings that confirm the impact of oils on corrosion processes and crack formation in reinforced concrete, as well as recommendations for protective measures to improve the durability of structures. **Conclusion.** A review of scientific sources indicates that oils play a significant role in industrial processes, but prolonged contact with reinforced concrete structures can lead to a considerable reduction in load-bearing capacity.

The results of scientific research confirm the need for further study of this phenomenon and the development of protective measures aimed at minimizing the negative effects of mineral oils.

Keywords: *mineral oils; reinforced concrete; load-bearing capacity; corrosion; concrete; shrinkage*

Постановка проблеми. Залізобетонні конструкції широко застосовуються в сучасному будівництві завдяки своїм високим фізико-механічним властивостям, зокрема міцності та довговічності. Проте в умовах впливу агресивних середовищ, таких як промислові мастильні матеріали, включаючи мінеральні оливи, їх несуча здатність може значно знижуватися [17]. Оливи, проникаючи в пори бетону, викликають зміну фізико-хімічних характеристик матеріалів, що призводить до порушення їх міцності та зменшення стійкості до механічних навантажень. Оскільки багато промислових об'єктів, де використовуються залізобетонні конструкції, перебувають у контакті з мінеральними оливами, виникає потреба в комплексному аналізі їх впливу на бетон і залізобетонні елементи. Проблема взаємодії олив і будівельних матеріалів є актуальною, оскільки знижена міцність може призвести до передчасного руйнування конструкцій та підвищення витрат на їх ремонт і обслуговування.

Аналіз публікацій. Вивченням впливу мінеральних олив та інших нафтопродуктів на залізобетонні конструкції присвячено дослідження К. Желько, А. Бартош, О. Волянський, Д. Плагін, Т. Костюк, В. Винниченко, О. Борзяк, А. Єфименко, С. Чепурна, М. Ярмоленко, О. Якименко, В. Черненко, Є. Клименко, К. Полянський. Серед зарубіжних досліджень цього напрямку варто виділити роботи С. Стіана, Д. Вейса, Р. Гошека, У. Грея, Р. Грюна, Г. Камінського, В. Манса, М.А. Матті, Ф. Перкінса, Б. Ролло, Е. Хартмана, Ф. Недесхаувена та В. Штейнбаха.

Аналіз робіт, присвячених питанню впливу мінеральних олив на бетон, показав, що ця проблема активно розвивається останні два десятиріччя. Це, безумовно, пов'язано з тим, що часто спостерігалися випадки виходу з ладу будівельних конструкцій, що піддавалися тривалому

промаслюванню, що змусило дослідників звернути увагу на цю проблему. Інтерес до неї не слабшає і до сьогодні. Найбільшу увагу провартують дослідження впливу олив на міцність бетону. Так, Чепурна С. [7] вказувала, що у промасленого бетону процеси твердіння не тільки припиняються, але й відбувається прогресуюче з часом зниження міцності. Салау М. [15] виявив зниження міцності на стиск цементно-піщаного розчину за 2 місяці зберігання в мастильній оливі на 12 %.

Клименко Є. [3] провів дослідження впливу мінеральних олив на міцність бетону, виготовленого на різних видах цементу. На основі отриманих результатів щодо міцності на стиск і на згин. Він встановив, що витримування бетонних зразків у мінеральному маслі призвело до зниження міцності зразків на 50 %. Іншим те, що бетону і розчини на портландцементі є більш вразливими до впливу олив у порівнянні до бетонів на цементах іншого складу.

Дворкін Л. вказує на зниження міцності бетону при натурних обстеженнях. Гриньова І., Штухец Д., Желько К., Бартош А. [2] стверджують, що дія олив і емульсій на бетон аналогічна дії на нього води, що виражається у зниженні міцності бетону на осьове розтягування. Їхні дослідження показали, що міцність бетону знизилася на 5-30%, причому зниження міцності тим більше, чим нижчий клас бетону.

Якименко О. [5] виявив ряд особливостей при вивченні фізико-механічних властивостей бетонів при дії на них мінеральних олив. Чим менша міцність бетону, тим більше за величиною зниження міцності. Майя Л. [13] стверджує, що після років експлуатації зниження міцності бетону, замасленого оливою, досягає 40–50 %. Причому найбільше зниження спостерігається в плитах перекриття, менше – в балках і ригелях. Така закономірність

пов'язана з формою контактної поверхні цих конструкцій.

Попри велику кількість результатів досліджень про стан міцності бетону при просочуванні його мінеральними оливами, бували випадки, коли не було помічено шкідливого впливу нафтопродуктів. Ролло Б. і Гошек Ю. [14] стверджують, що промаслювання чинить негативний вплив на бетон тільки через тривалий термін. Вони також досліджували вплив важких олив на міцність цементних розчинів і дійшли висновку, що падіння міцності розчину спостерігається до трьох місяців, а потім величина міцності розчину стабілізується і залишається практично постійною протягом 12 місяців. Відзначено, що падіння міцності просочених зразків залежить від умов попереднього твердіння.

Аналіз наукових праць показує, що вплив олив на залізобетон може призводити до значних змін у хімічному і фізичному складі бетону, а також знижувати довговічність і міцність конструкцій. Оливи можуть взаємодіяти з компонентами бетону, змінюючи його властивості і прискорюючи корозію арматури. Технологічні підходи, такі як застосування добавок, захисних

покриттів і спеціальних методів ремонту, можуть допомогти покращити стійкість бетону до негативного впливу олив.

Цілі й завдання. Метою цієї статті є огляд сучасних наукових досліджень і теоретичних підходів до оцінки впливу мінеральних олив на несучу здатність стиснутих залізобетонних елементів. Завдання статті включають аналіз властивостей мінеральних олив та вивчення основних механізмів впливу мінеральних олив на бетон, таких як проникнення в пори, адсорбція та утворення мікротріщин.

Виклад основного матеріалу. Мінеральні оливи є важливою складовою в різноманітних галузях промисловості, включаючи автомобільну, авіаційну та виробничу сфери. Їх використовують як мастильні матеріали, теплоносії, ізоляційні рідини та для інших специфічних застосувань. Ці оливи виробляють шляхом рафінації нафти і містять різноманітні вуглеводневі сполуки [9]. Їх склад значно впливає на фізичні та хімічні властивості, такі як в'язкість, температурна стійкість і схильність до окислення. Основні компоненти мінеральних олив відображено у таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад мінеральних олив

Тип вуглеводнів	Хімічна формула	Основні властивості	Основні використання
Парафінові	C_nH_{2n+2}	Висока стабільність, хороші мастильні властивості	Автомобільні оливи, мастильні матеріали
Нафтеніві	C_nH_{2n}	Текучість при низьких температурах	Гідравлічні рідини, мастильні матеріали
Ароматичні	C_nH_n	Розчинність, окислювальна стійкість	Очищення двигунів, захист від корозії

Таблиця 2

Фізичні властивості мінеральних олив

Властивість	Опис	Вимірювання	Вплив на використання
В'язкість	Опір текучості	cСт, Па·с	Мастильні властивості, енергоефективність
Індекс в'язкості	Зміна в'язкості з температурою	Безрозмірний	Стабільність у різних температурних умовах
Температура застигання	Мінімальна температура плинності	°C	Використання при низьких температурах
Температура спалаху	Температура запалення парів	°C	Безпека, пожежна стійкість
Густина	Маса в одиниці об'єму	г/см ³ , кг/м ³	Змазувальні властивості, енергетична ефективність
Стійкість до зрізу	Збереження в'язкості під навантаженням	% зміни	Надійність при високих навантаженнях

Кожен тип вуглеводнів надає мінеральним оливам унікальні властивості, що може бути використано для різних застосувань шляхом регулювання їх відносного вмісту. Наприклад, більший вміст парафінових вуглеводнів підвищує стабільність олив при високих температурах, тоді як нафтонові вуглеводні забезпечують кращу текучість в умовах низьких температур. Хімічний склад мінеральних олив є критично важливим для їх ефективного використання. Розуміння ролі кожного типу вуглеводнів допомагає в оптимізації їх властивостей для конкретних умов експлуатації [17].

Фізичні властивості мінеральних олив визначають їх здатність виконувати основні функції в різних умовах експлуатації. Основні фізичні властивості включають в'язкість, температурну стійкість, густину та інші характеристики [9], що відображено у таблиці 2.

Фізичні властивості мінеральних олив є ключовими для їх ефективного використання в умовах високих температур, тисків, і механічних навантажень. Наприклад, оливи з високою в'язкістю підходять для важких навантажень, тоді як оливи з низькою температурою застигання забезпечують ефективність при холодному старті. Розуміння фізичних властивостей мінеральних олив є критично важливим для їх оптимального вибору та використання в різних промислових і технічних сферах [4].

Мінеральні оливи мають широке застосування в автомобільній промисловості (моторні оливи зменшують тертя і знос у двигунах, а трансмісійні та гідравлічні рідини забезпечують роботу відповідних систем); промислового обладнання (мастильні матеріали та теплоносії зменшують тертя і передають тепло в машинах та електричних пристроях); енергетиці (турбінні оливи охолоджують турбіни, а оливи в гідроелектростанціях зменшують тертя) та спеціальних технічних сферах (оливи використовуються в космічній та авіаційній техніці для терморегуляції і охолодження) [10].

Вибір мінеральної оливи залежить від вимог експлуатації: для автомобільних двигунів важливі стійкість до високих температур і зносу, для промислових машин – стабільність при навантаженнях. Мінеральні оливи, отримані з нафти, відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності й довговічності обладнання, завдяки своїм фізичним і хімічним властивостям, таким як в'язкість і окислювальна стійкість. Вони широко застосовуються в автомобільній і промисловій сферах, забезпечуючи мастило, теплообмін і ізоляцію [14]. Мінеральні оливи використовуються в енергетичному секторі для мастила і охолодження турбін, а також у спеціальних технічних сферах, таких як космічна і авіаційна техніка, де важлива їх стабільність. Їх унікальні властивості роблять їх незамінними для забезпечення надійності та довговічності систем.

Вплив олив на будівельні матеріали залежить від умов використання: вони можуть як покращувати довговічність, так і знижувати міцність через хімічну взаємодію або фізичний вплив, тому їх застосування потребує ретельного контролю для запобігання негативним наслідкам [6]. Нафтопродукти, що проникають у бетон, знижують міцність конструкцій. В умовах військових дій, кількість аварій в наслідок яких відбувається промаслювання конструкцій суттєво зростає.

Мінеральні оливи, потрапляючи в мікродіфекти бетону, спричиняють адсорбційне зниження його міцності та, крім того, чинять розклинювальну дію, що, в свою чергу, знижує міцність бетону [1]. Також відбувається зниження зчеплення бетону з арматурою, це призводить до зниження міцності матеріалу конструкцій і можливості обвалення при експлуатаційних навантаженнях. Визначення зміни динамічних, міцнісних і деформативних характеристик залізобетонних конструкцій з урахуванням впливу нафтопродуктів дасть змогу оцінити стійкість конструкцій і підвищити рівень їхньої безпеки за цих впливів.

Мінеральні оливи, використовувані в промисловості, можуть мати негативний вплив на бетонні конструкції через хімічні та фізичні процеси. Вони знижують рН бетону, викликають корозію через реакцію з кальцієвими сполуками, а також сприяють розвитку бактерій, що погіршує міцність конструкцій стверджують науковці Даркен А., Хохар М., Розьєр Е. [8]. Проникнення олив у пори бетону викликає набухання та утворення тріщин. Дослідження підтверджують, що дія мінеральних олив знижує міцність і адгезію бетону, скорочуючи термін служби конструкцій, що потребує розробки захисних заходів [11].

Важливо зазначити, що несуча здатність залізобетонних конструкцій в умовах стиснення є ключовим аспектом проектування та аналізу будівельних елементів, що забезпечує їх стабільність і довговічність. Залізобетон поєднує переваги бетону і сталі, що надає йому високу міцність і пластичність, необхідні для підтримки значних навантажень [8]. Ці конструкції широко використовуються в будівництві через їх здатність витримувати великі навантаження, особливо в проектуванні висотних будівель, мостів, тунелів та інших інфраструктурних об'єктів.

Стиснення є однією з основних форм навантаження, що впливає на несучу здатність залізобетонних елементів, і її вплив має вирішальне значення для їхньої безпеки та довговічності [12]. Бетон і сталь мають різні механічні властивості, які по-різному реагують на стиснення. Бетон має високу міцність на стиснення, але відносно низьку міцність на розтягнення, тоді як сталь, навпаки, має високу міцність на розтягнення, але меншу міцність на стиснення. Завдяки комбінації цих властивостей залізобетонні конструкції здатні ефективно переносити значні навантаження на стиснення. Несуча здатність залізобетонних конструкцій залежить від кількох ключових факторів. По-перше, це якість бетону і арматури. Міцність і якість використаних матеріалів безпосередньо впливають на несучу здатність конструкції витримувати

навантаження. По-друге, форма перерізу і геометрія конструкцій також мають значення. Форма і розміри залізобетонних елементів впливають на їх здатність несучу здатність. Зміни в геометричних розмірах перерізу, такі як товщина стін або висота балок, можуть значно вплинути на навантаження, яке може сприйняти конструкція [16]. По-третє, армування. Розміщення і кількість арматури в залізобетонних елементах критично важливі для їхньої несучої здатності. Арматура підвищує міцність на розтяг і допомагає запобігти утворенню тріщин у бетоні, що може зменшити його ефективність при стисненні [7]. Дослідження впливу зовнішнього середовища на залізобетонні конструкції в умовах стиснення є критично важливим для забезпечення їхньої надійності та довговічності. Висока міцність на стиснення забезпечує здатність конструкції витримувати значні навантаження і підвищує її стійкість до зовнішніх впливів. Якість арматури також є важливою складовою несучої здатності. Сталь, що використовується для армування, повинна мати високу міцність на розтягнення та корозійну стійкість [5]. Адгезія між бетоном і арматурою також є критичним аспектом для забезпечення міцності залізобетонних конструкцій, адгезія між матеріалами впливає на здатність конструкції переносити навантаження.

У свою чергу, мінеральні оливи відіграють важливу роль у будівництві завдяки своїм особливим властивостям, таким як висока в'язкість, термостійкість і хімічна стабільність. Вони здатні зменшувати пористість і водопоглинання, що підвищує довговічність бетонних і цементних сумішей. Однак порушення умов використання олив може призвести до негативних наслідків, включаючи зниження міцності матеріалів та корозію металевих елементів, що підкреслює необхідність контролю якості олив і їх правильного застосування. Результати експериментальних досліджень вказують на те, що мінеральні оливи можуть суттєво впливати

на загальні властивості бетону, знижуючи його міцність та змінюючи структуру, що може призвести до збільшення ризику корозії арматури. Розробка нових технологій, таких як спеціальні добавки та захисні покриття, є критично важливою для збереження структури та функціональності будівель у середовищах, схильних до контакту з оливами [6]. Систематичні дослідження і впровадження нових технологій допоможуть запобігти витратам на відновлення та забезпечити безпечну і надійну експлуатацію будівельних конструкцій.

Висновки

Ефективність мінеральних олив у будівництві залежить від конкретних умов і вимог. Важливо враховувати їх властивості, взаємодію з матеріалами та експлуатаційні умови. Таким чином, використання олив має

бути продуманим і зваженим, що передбачає проведення досліджень для досягнення оптимальних результатів. Дослідження показують, що мінеральні оливи можуть мати як позитивний, так і негативний вплив на залізобетон, залежно від складу і умов експлуатації. Оливи можуть покращувати водостійкість бетону, але їх взаємодія з компонентами може знижувати міцність.

Отже, огляд наукових джерел свідчить про значний негативний вплив олив на бетон, однак також підкреслює, що його можна частково мінімізувати шляхом застосування сучасних технологій. Це відкриває перспективи для майбутніх досліджень та розробки нових матеріалів і методів, які дозволять підвищити довговічність залізобетонних конструкцій у агресивних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борзяк О., Плугін А., Чепурна С. Вплив добавки високодисперсного кальциту на корозійну стійкість цементних композитів. *VIII Міжнар. наук.-техн. конф.* (м. Харків, 20–22 листопада 2019 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2019. С. 137–138.
2. Гриньова І., Штухец Д., Желько К., Бартош А. Несуча здатність пошкоджених залізобетонних конструкцій. *Молодий вчений*. 2022. № 11 (111). С. 1–3.
3. Клименко Є., Полянський К. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану пошкоджених залізобетонних балок. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 76. С. 24–30.
4. Черненко В. Технологія будівельного виробництва. Київ : Вища школа, 2014. 425 с.
5. Якименко О., Кондращенко О., Атинян А. Бетонні роботи : монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 275 с.
6. Ярмоленко М. Технологія будівельного виробництва. Київ : Вища школа, 2018. 322 с.
7. Cherpurna S. Concretes, Modified by the Addition of High-Diffused Chalk, for Small Architectural Forms. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. Pp. 82–88.
8. Darquennes A., Khokhar M., Rozière E. Early age deformations of concrete with high content of mineral additions. *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25, is. 4. Pp. 1836–1847.
9. Diab H. Compressive strength performance of low- and high-strength concrete soaked in mineral oil. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 33. Pp. 25–31.
10. Dvorkin L., Zhitkovsky V., Ribakov Y. Concrete and Mortar Production Using Stone Sifting. *CRC Press Taylor and Frensis group*. 2018. Pp. 158–167.
11. Kameche Z., Ghomari F., Choiniska M., Khelidj A. Assessment of liquid water and gas permeabilities of partially saturated ordinary concrete. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 65. Pp. 551–565.
12. Kostyuk T., Vinnichenko V., Plugin A., Borziak O., Iefimenko A. Physicochemical studies of the structure of energy-saving compositions based on slags. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 1021. Pp. 93–98.
13. Maia L., Figueiras J. Early-age creep deformation of a high strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 34. Pp. 602–610.
14. Rollo B., Hosek Y. The Desinted ration of concrete by oils. *Durability of concrete*. Prague : Czechoslovak Akademy of Sciences, 1962. Pp. 21–34.
15. Salau M. Long-term deformations of laterized concrete short columns. *Building and Environment*. 2003. Vol. 38, is. 3. Pp. 469–477.
16. Yurtdas I., Xie S., Burlion N. Influence of chemical degradation on mechanical behavior of a petroleum cement paste. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, is. 4. Pp. 412–421.

17. Zhang J., Weissinger E., Peethamparan S., Scherer G. Early hydration and setting of oil well cement. *Cement and Concrete Research*. 2010. Vol. 40, is. 7. Pp. 1023–1033.

REFERENCES

1. Borziak O.S., Plugin A.A. and Chepurna S.M. *Vplyv dobavky vysokodispersnoho kal'tsytu na korozivnu stiykist' tsementnykh kompozytiv* [Influence of high-dispersed calcite addition on the corrosion resistance of cement composites]. *VIII Mizhnar. nauk.-tekhn. konf.* [VIII International Scientific and Technical Conference]. Kharkiv, November 20–22, UkrDUZT Publ., 2019, pp. 137–138. (in Ukrainian).
2. Hryniova I., Shukheta D., Zhelko K. and Bartosh A. *Nesucha zdattist' poshkodzhennykh zalizobetonnykh konstruktiv* [Load-bearing capacity of damaged reinforced concrete structures]. *Molodyy vchenyy* [Young Scientist]. 2022, no. 11 (111), pp. 1–3. (in Ukrainian).
3. Klymenko Ye.V. and Polyansky K.V. *Eksperymental'ni doslidzhennya napruzhenno-deformovanoho stanu poshkodzhennykh zalizobetonnykh balok* [Experimental research on the stress-strain state of damaged reinforced concrete beams]. *Visnyk Odes'koi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2019, no. 76, pp. 24–30. (in Ukrainian).
4. Chernenko V. *Tekhnolohiya budivl'noho vyrobnytstva* [Technology of Construction Production]. Kyiv : Vyshcha Shkola Publ., 2014, 425 p. (in Ukrainian).
5. Yakymenko O.V., Kondrashchenko O.V. and Atinyan A.O. *Betonni roboty : monohrafiya* [Concrete Works : monograph]. Kharkiv : KNUMG named after O.M. Beketov, 2017, 275 p. (in Ukrainian).
6. Yarmolenko M. *Tekhnolohiya budivl'noho vyrobnytstva* [Technology of Construction Production]. Kyiv : Vyshcha Shkola Publ., 2018, 322 p. (in Ukrainian).
7. Chepurna S. Concretes, Modified by the Addition of High-Diffused Chalk, for Small Architectural Forms. *Materials Science Forum*. 2019, vol. 968, pp. 82–88.
8. Darquennes A., Khokhar M. and Rozière E. Early age deformations of concrete with high content of mineral additions. *Construction and Building Materials*. 2011, vol. 25, is. 4, pp. 1836–1847.
9. Diab H. Compressive strength performance of low- and high-strength concrete soaked in mineral oil. *Construction and Building Materials*. 2012, vol. 33, pp. 25–31.
10. Dvorkin L., Zhitkovsky V. and Ribakov Y. *Concrete and Mortar Production Using Stone Sifting*. CRC Press Taylor and Francis group, 2018, pp. 158–167.
11. Kameche Z., Ghomari F., Choinska M. and Khelidj A. Assessment of liquid water and gas permeabilities of partially saturated ordinary concrete. *Construction and Building Materials*. 2014, vol. 65, pp. 551–565.
12. Kostyuk T., Vinnichenko V., Plugin A., Borziak O. and Iefimenko A. Physicochemical studies of the structure of energy-saving compositions based on slags. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 1021, pp. 93–98.
13. Maia L. and Figueiras J. Early-age creep deformation of a high strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2012, vol. 34, pp. 602–610.
14. Rollo B. and Hosek Y. The Desinted ration of concrete by oils. *Durability of concrete*. Prague : Czechoslovak Academy of Sciences, 1962, pp. 21–34.
15. Salau M. Long-term deformations of laterized concrete short columns. *Building and Environment*. 2003, vol. 38, is. 3, pp. 469–477.
16. Yurtdas I., Xie S. and Burlion N. Influence of chemical degradation on mechanical behavior of a petroleum cement paste. *Cement and Concrete Research*. 2011, vol. 41, is. 4, pp. 412–421.
17. Zhang J., Weissinger E., Peethamparan S. and Scherer G. Early hydration and setting of oil well cement. *Cement and Concrete Research*. 2010, vol. 40, is. 7, pp. 1023–1033.

Надійшла до редакції: 12.03.2025.

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.48.1143

ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ З ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ СТАЛІ НА СТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КЛИНКА НОЖА

КАЧУР В. І., *асп.*

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 (096) 810-77-91, e-mail: spbdnepr@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-8838-4295

Анотація. Вступ. Головною вимогою до якісної ножової сталі є її збалансований хімічний склад і відповідна термічна обробка, яка забезпечує оптимальні показники твердості, зносостійкості та корозійної стійкості ріжучої частини. Саме поєднання цих характеристик визначає експлуатаційні властивості ножа, включаючи його здатність тривалий час утримувати ріжучу кромку та протистояти механічним і хімічним впливам. Сучасна промисловість пропонує широкий спектр якісних матеріалів для виготовлення ножів, зокрема інструментальні сталі, спеціальні штампові сталі, а також високотехнологічні сталі, отримані методом порошкової металургії. Використання порошкових технологій дозволяє досягти однорідної мікроструктури, підвищеної зносостійкості та покращеної міцності, що робить такі матеріали особливо популярними серед виробників високоякісних ножів. **Матеріали та методика.** У цій роботі була використана конструкційна шарикопідшипникова сталь ШХ15Ш (ТУ 141594, DSTU 4738:007) та жаростійка нержавіюча сталь 40X13 (DSTU 4738:007), які поєднуються між собою методом горнового зварювання. Сталь ШХ15Ш є високовуглецевою легованою сталлю з високою твердістю та чудовою зносостійкістю, що робить її придатною для виготовлення ріжучої частини. Водночас, сталь 40X13 характеризується високою корозійною стійкістю та ударною в'язкістю, що дозволяє використовувати її для обкладок композитного матеріалу. Таким чином, отриманий композитний клинок поєднує в собі жорсткість і гостроту ріжучої частини з механічною міцністю та стійкістю до корозії зовнішніх шарів. **Результати експерименту.** Для порівняння ефективності різних матеріалів досліджується також клинок із сталі N690 (Böhler, Австрія) – високоякісної кобальтової нержавіючої сталі мартенситного класу. Додавання кобальту до сплаву сприяє утворенню більш дрібнозернистої мікроструктури, що покращує загальні експлуатаційні характеристики матеріалу. Крім того, ця сталь відома своєю високою твердістю (до 60 HRC після термообробки) та стійкістю до зношування, що робить її популярною серед виробників преміальних ножів. **Висновки.** Подальший аналіз порівняльних характеристик отриманих клинків дозволить визначити їх оптимальні сфери застосування та оцінити ефективність використання композитних матеріалів у ножовій індустрії.

Ключові слова: залишковий аустеніт; зернистий перліт; дрібногольчастий мартенсит; глобулярні карбіди; відпал; відпуск; загартовування; границя зерна; комплексне легування; зносостійкість; складні карбіди

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION WITH HEAT TREATMENT OF STEEL ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A KNIFE BLADE

KACHUR V.I., *Postgrad. Stud.*

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 (066) 409-89-05, e-mail: spbdnepr@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-8838-4295

Abstract. Introduction. The main requirement for high-quality knife steel is its balanced chemical composition and appropriate heat treatment, which provides optimal indicators of hardness, wear resistance and corrosion resistance of the cutting part. It is the combination of these characteristics that determines the operational properties of the knife, including its ability to hold the cutting edge for a long time and resist mechanical and chemical influences. Modern industry offers a wide range of high-quality materials for the manufacture of knives, including tool steels, special die steels, as well as high-tech steels obtained by powder metallurgy. The use of powder technologies allows you to achieve a homogeneous microstructure, increased wear resistance and improved strength, which makes such materials especially popular among manufacturers of high-quality knives. **Materials and methods.** In this work, structural ball bearing steel ShKh15Sh (TU 141594, DSTU 4738:007) and heat-resistant stainless steel 40X13 (DSTU 4738:007) were

used, which are combined with each other by the method of furnace welding. Steel ShKh15Sh is a high-carbon alloy steel with high hardness and excellent wear resistance, which makes it suitable for the manufacture of the cutting part. At the same time, steel 40X13 is characterized by high corrosion resistance and impact toughness, which allows it to be used for composite material linings. Thus, the resulting composite blade combines the rigidity and sharpness of the cutting part with the mechanical strength and corrosion resistance of the outer layers. **The results of the experiment.** In the course of research, it was found that changes in the chemical composition of the 40KXHM alloy significantly affect its mechanical properties, including hardness and resistance to shock loads. An increase in the content of carbon, molybdenum and chromium in the alloy leads to an increase in its hardness. This is with the formation of stronger carbide and molybdenum phases in the structure of the alloy, which leads to an improvement in its mechanical properties. Increased hardness makes the alloy more resistant to wear and increases its durability in operating conditions. An increase in the nickel content in the alloy leads to an increase in its resistance to shock loads. This is caused by an increase in plasticity and impact toughness of the alloy with an increased nickel content. Higher resistance to shock loads makes the alloy suitable for use in conditions that require high resistance to shocks, for example, in the production of machine parts and equipment. A mathematical model of the dependence of the strength of the alloy on the percentage content of the components of the chemical composition was built, which allows to control the indicators of the strength of the alloy in the process of its manufacture. **Conclusions.** To compare the effectiveness of different materials, a blade made of N690 steel (Böhler, Austria) is also studied – a high-quality cobalt stainless steel of the martensitic class. Adding cobalt to the alloy contributes to the formation of a finer-grained microstructure, which improves the overall performance characteristics of the material. In addition, this steel is known for its high hardness (up to 60 HRC after heat treatment) and wear resistance, which makes it popular among manufacturers of premium knives. **Conclusions.** Further analysis of the comparative characteristics of the obtained blades will allow to determine their optimal areas of application and assess the effectiveness of the use of composite materials in the knife industry.

Keywords: retained austenite; granular pearlite; fine-needle martensite; globular carbides; annealing; tempering, hardening; grain boundary; complex alloying; wear resistance; complex carbides

Вступ. Клинок ножа повинен відповідати вимогам його застосування а саме: мати гарну зносостійкість робочої частини, відповідну геометрію і лінійні розміри, високі показники корозійної стійкості, пружності, витримувати бокової та контактні навантаження. Зносостійкість ріжучої кромки напряму залежить від структури і твердості сталі, які забезпечуються термопластичною та термічною обробкою. Режим термічної обробки, температури нагрівання, витримки, швидкості охолодження залежать від хімічного складу сплавів. Тому до вибору марки сталі для леза ножа, треба підходити дуже відповідально. В нашій роботі буде проводитися порівняння двох технологій виготовлення клинків ножів,

проаналізований хімічний склад вихідних матеріалів, мікроструктури на різних етапах термічної обробки, дефекти які можуть з'явитися при порушенні температурно-часових режимів обробки.

Мета завдання: Експериментально встановити оптимальні режими термічної обробки композитного клинка ШХ15Ш в обкладинках 40X13, та клинка із моносталі n690. Проаналізувати кінцеві мікроструктури для отримання необхідних механічних властивостей, виявити переваги та недоліки одного способу виготовлення над іншим.

Матеріали та методика. Для чистоти експерименту використаємо однакові клинки по геометрії і лінійним розмірам, дивись (табл. 1) [16].

Таблиця 1

Геометричні розміри клинка

Повна довжина клинка (мм)	Ріжуча частина (мм)	Ширина клинка (мм)	Довжина хвостовика (мм)	Товщина обуха (мм)
200	110	20	90	4

Клинки повинні виготовлятися методом ручного кування з дотримання всіх технологічних режимів, які будуть розраховані і оптимально відповідати

умовам застосування інструменту. За прототип візьмемо клинок фінського типу, за його універсальність та здатність працювати в екстремальних умовах і

витримувати значні навантаження. Товщина в обухі близько 4 мм – забезпечить нам запас міцності на злам при бокових навантаженнях, а невелика довжина ріжучої частини при ширині в 20 мм, надійну міцність при правильній термічній обробці.

Результати експерименту. Виходячи з умов застосування клинка, геометрії і експлуатаційних вимог, обирається матеріал- марка сталі для його виготовлення. Для забезпечення високих показників зносостійкості, ріжуча частина на ножі повинна виготовлятися з високовуглецевої інструментальної,

штампової, конструкційної шарикопідшипникової, пружинноресорної або порошкової сталі з вмістом вуглецю не менше – 0,6 %. Клинок ножа з меншим відсотком по вуглецю, навіть при грамотній термопластичній обробці, не забезпечить тривалої роботи без підточування. Потрібно також враховувати корозійну стійкість ріжучої частини, що також впливає на зносостійкість. Тому для композитного клинка, враховуючи вартість і доступність матеріалу вибираємо сталі ШХ15Ш і 40Х13. Хімічний склад яких (табл. 2, 3).

Таблиця 2

Хімічний склад сталі ШХ15Ш [8]

Сталь	ТУДСТУ	C	Si	Mn	Cr	P	S	Ni	Cu	примітка
ШХ15Ш	ТУ141594 ДСТУ 4738:007	0,95–1,05	0,17–0,37	0,20–0,40	1,30–1,65	0,027	0,02	0,25	0,25	Ni, Cu не більше 0,5 %

Таблиця 3

Хімічний склад сталі 40Х13 [2]

Сталь	C	Si	Mn	Cr	S	P
		не більше			не більше	
40Х13	0,36–0,45	0,8	0,8	12,0–14,0	0,025	0,030

За своєю структурою сталь шх-15 ш схожа на звичайні вуглецеві сталі. Невеликий відсоток хрому позитивно впливає на її прогартованість і дозволяє застосовувати менші швидкості охолодження. А високий вміст вуглецю, приблизно 1 % надає сталі після термічної обробки показників твердості на рівні 62-65 HRC. Хром розчиняється в обох фазах після відпалу, як в фериті, так і в цементиті. Легований хромом цементит повільно розчиняється в аустеніті, а аустеніт з хромом, повільно розпадається, цим і пояснюється менша швидкість гартування в порівнянні з вуглецевими сталями. Сталь отримана методом електрошлакового переплаву з мінімумом шкідливих домішок.

Сталь 40Х13 відноситься до класу хромистих мартенситних. Основні легуючі

елементи хром та вуглець. Сплав містить в своєму складі 13 % хрому, що відповідає мінімуму для забезпечення підвищеної корозійної стійкості [7].

Для порівняння оберемо моносталеву австрійського виробника компанії Bohler Uddeholm- n690. Ця сталь відноситься до мартенситного класу, та отримана методом електрошлакового переплаву. По способу застосування схожа на ШХ15Ш, але збільшеним відсотком легуючих елементів. Її застосовують для виготовлення підшипників, які працюють в агресивних середовищах, ріжучого інструменту, ножів м'ясорубних машин. Велике розповсюдження цей сплав отримав у виробництві туристичних, мисливських ножів для виживання.

Таблиця 4

Хімічний склад сталі n690 (Австрія) [9]

Сталь	C	Cr	Mo	V	Co	Mn
n690	1–1,08	16,8–17,3	0,9–1,1	0,1	1,4–1,5	0,35–0,4

Сталь має відносно невисоку вартість, що дає можливість використовувати її для виготовлення клинків середнього цінового рівня.

Хімічний склад сплаву дивись таблицю 4.

Сталь за своїм хімічним складом схожа на VG-10 Японія, X102CrMo17 (Німеччина), 95 X18 (Україна), але на відміну від аналогів має у своєму складі кобальт. Цей елемент позитивно впливає на жароміцність сплаву, але негативна впливає на прогартованість.

1. Вуглець – 1,08 % необхідний для підняття міцності, надає сплаву необхідну твердість.

2. Хром – 17,3 % забезпечує супротив руйнуванню при високих температурах, значно покращує прогартованість сплаву, твердість.

3. Молібден – 1,05 % необхідний для мінімізації крихкості, забезпечує жаростійкість матеріалу, стійкість до підвищених температур, значно підвищує прогартованість.

4. Ванадій – 0,10 % підвищує пружність сплаву, в комплексі з хромом забезпечує руйнуванню корозією.

5. Кобальт – 1,5 % є основним легуючим елементом для кобальтової нержавійки, забезпечує поліпшення механічних властивостей, жароміцність, яка необхідна для обробляючого інструменту.

6. Марганець – 0,4 % позитивна впливає на твердість та міцність.

7. Кремній – 0,4 % забезпечує зносостійкість, збільшує стабільність та надійність сплаву [2].

Горнове зварювання.

Операція, яка дозволяє з'єднувати в композит сталі з різним вуглецевим еквівалентом. В нашому випадку, шарикопідшипникова хромиста ШХ15Ш та жаростійка нержавіюча 40X13. В результаті отримуємо композитний сплав з властивостями високої корозійної стійкості та відмінною зносостійкістю ріжучої частини клинка. Фактори, які впливають на успішність операції горнового (ковальського зварювання):

1. Правильно підібраний флюс (речовина яка запобігає проникненню кисню в зону зварювання).

2. Вага пакету (чим більше вага, тим довший час потрібний на нагрів).

3. Теплопровідність сталей (залежність від вмісту вуглецю та легуючих елементів).

4. Середовище нагрівання (газ, кам'яне вугілля, деревне вугілля).

5. Температура в приміщенні де проводяться роботи.

6. Швидкість та час пластичного деформування при механічному з'єднанні пакету з витисненням флюсу.

Остання операція (витиснення флюсу з зони зварювання на наковальні) відіграє суттєве значення. Якщо пакет буде недостатньо прогрітим температура нижча за температуру 1 200, 1 250 °C та час з'єднання перевищений $T = 1,5-2$ хвилини, горнове зварювання буде низької якості. Отримаємо не провари по площинам з'єднання і як наслідок втрата міцності та монолітності пакету. Перевищення температурно-часових показників веде до утворення осередків оплавлень, вигорання легуючих елементів та вуглецю з структури сплавів, зростає ймовірність утворення пор та порожнин в з'єднанні. Як наслідок отримуємо велику кількість мікротріщин, які при невеликому навантаженні об'єднуються в магістральну (крихке руйнування). При безпомилково проведеній операції з дотриманням технологічних режимів, отримуємо монолітне з'єднання сталей з атомарним змішуванням хімічних елементів в зоні зварного шову.

Після проведення шести експериментальних випробувань (пружність, твердість, зносостійкість ріжучої кромки) приймаємо наступні режими виготовлення композитного клинка дивись таблицю 5.

При відпуску $T = 270$ °C і витримці 3 години клинок витримав навантаження але залишкова деформація перевищила 1 мм на довжину клинка, що не відповідає вимогам Держстандарт 51500- 99 “ Ножі та кинжали мисливські” , Дата введення 2000-07-01.

Приймаємо режими відпуску $T = 270\text{ }^{\circ}\text{C}$, тривалість дві години твердість 59–59,5 HRC.

*При проведенні випробувань, клинок затискався в лецатах на глибину 10 мм вздовж осової лінії ножа, фіксація відбулася у вертикальному положенні.

Навантаження проводилась поступово, без зміни знаку. Мета випробувань – перевірити пружність кінцевої частини клинка, яка максимальна навантажена при роботі на злам.

Структури сталі шх15ш після операцій термічної обробки (табл. 8).

Таблиця 5

Температурно-часові режими виготовлення клинка з композитної сталі ШХ15Ш в обкладинках 40Х13 [9]

Назва операції	Температура (Т, °С)	Час τ (хв.)
Рекристалізаційний відпал	720-740	57
Ковальське (горнове) зварювання	1 200–1 250	16*
Виготовлення клинка методом кування	750–950	50
Неповний відпал	840	17
Загартування	840	13
Відпуск	270	123

* Підігрів пакету 15 хвилин, з'єднання під флюсом 1,5–2 хвилини.

Таблиця 6

Залежність твердості клинка ножа від температури відпуску сталі ШХ15Ш

Марка сталі	Тривалість відпуску (год)	HRC при температурі відпуску °С (середнє значення замірів)			
ШХ15Ш		150	180	220	270
	1	67	66,5	64,5	63,5
	1,5	63,5	63	63	61,5
	2	63	62,5	61	59,5
	3	62,5	61	59,5	58

Таблиця 7

Результати випробувань на пружність композитних клинків [5]

Марка сталі	Тривалість відпуску (год)	HRC при температурі відпуску °С (середнє значення замірів)				Навантаження (кгс)	Результати випробувань
ШХ15Ш в обкладках 40Х13 (композит)		150	180	220	270	250*	
	1	67	66,5	64,5	63,5		Руйнування
	1,5	63,5	63	63	61,5		Руйнування
	2	63	62,5	61	59,5		+
	3	62,5	61	59,5	58		Залишкова деформація

* Клинок витримав навантаження без залишкової деформації за температури 270 °С і витримці 2 години. За $T = 150\text{ °C}$, $T = 180\text{ °C}$, $T = 200\text{ °C}$ при витримці дві години, клинки зламались.

Таблиця 8

Структури сталі ШХ15Ш після термообробки [4]

Вид термічної обробки	Назва структури
Відпал (рекристалізаційний)	зернистий перліт з цементитними зернами від 1 до 10 мкм
Загартування	мартенсит з залишковим аустенітом та дрібні карбіди
Відпуск	Дрібногочастий мартенсит відпуску (схований мартенсит, дрібні мілкодисперсні карбіди рівномірно розподілені по структурі, залишковий аустеніт)*

* Відсоток залишкового аустеніту складає 8–10 %. Він рівномірно розчиняється по об'єму зразка, що його важко помітити навіть за допомогою силового оптичного мікроскопу. виявляється рентгеноструктурним аналізом.

Технологічний процес виготовлення клинка ножа з моносталі п690.

Технологічний процес включає в себе наступні операції:

1. Рекристалізаційний відпал.

2. Виготовлення клинка методом кування.

3. Ізотермічний відпал.

4. Загартування.

5. Кріообробка [11].

6. Розмерзання.

7. Відпуск.

Температурно-часові режими виготовлення леза ножа (табл. 9).

Таблиця 9

Температурно- часові режими виготовлення клинка із сталі п690

Вид термічної обробки	Назва структури
Відпал (рекристалізаційний)	зернистий перліт з цементитними зернами від 1 до 10 мкм
Загартування	мартенсит з залишковим аустенітом та дрібні карбіди
Відпуск	Дрібногочастий мартенсит відпуску (схований мартенсит, дрібні мілкодисперсні карбіди рівномірно розподілені по структурі, залишковий аустеніт)*

* Охолодження в рідкому азоті.

Кріообробка – обробка холодом, використовується для зменшення кількості залишкового аустеніту та перетворення його в мартенсит, для високовуглецевих, легованих сталей [1]. Так як у сталях з високим відсотком вуглецю, кінець мартенситного перетворення (Мк лінія), лежить в області мінусових температур, кількість залишкова аустеніту в високовуглецевих сталях без кріообробки може складати 35–45 %, що негативно впливає на механічні властивості клинка ножа – твердість, зносостійкість ріжучої

кромки, супротив контактним навантаженням.

Результати випробувань клинків з мартенситної сталі п690 на пружність (табл. 10).

За температур відпуску $T = 150\text{ °C}$, $T = 180\text{ °C}$ клинки зламались (витримка – 1 година). Після відпуску клинків за температур $T = 150\text{ °C}$, $T = 180\text{ °C}$, $T = 220\text{ °C}$ та витримці 2 години клинки не зламались але залишкова деформація перевищила 1 мм на довжину клинка, що не відповідає вимогам Держстандарт 51500-99.

Таблиця 10

Випробування клинків зі сталі п690 на пружність [5]

Марка сталі	Тривалість відпуску	HRC за температури відпуску °C			Навантаження (кгс)	Результати випробування
п690		150	180	220	250	
	1	61,5	61	60,5		+
	2	58,5	58	57,5		Залишкова деформація

* Клинок витримав навантаження при температурі $T = 220$ °C, витримці 1 година, відповідна твердість: 60,5- 61 HRC.

Таблиця 11

Структура сталі п690 після термообробки

Вид термічної обробки	Назва структури
Рекристалізаційний відпал	Зернистий переліт з карбідами
Загартування	Мартенсит, залишковий аустеніт, карбіди
Відпуск	Мартенсит відпуску з нерівнорозмірними карбідами, залишковий аустеніт

Випробування на зносостійкість кинжали мисливські». Результати приведені в таблиці 12.

ріжучого кромки ножа проводились по вимогам Держстандарт Р 51500-99 «Ножі та

Таблиця 12

Результати випробувань на зносостійкість клинків [5]

Сталь клинка ножа	Кут загострення ріжучої кромки в градусах	Матеріал для випробувань	Кількість та якість поверхні зрізу шкала 5 балів
Композит ШХ15Ш в обкладках 40X13	36	Березова паличка діаметром 12 мм та вологості не більше 12 %	*
			180/5
			175/4
			168/4
			182/5
			184/5
п690	36	Березова паличка діаметром 12 мм та вологості не більше 12 %	Σ 178/5
			*
			215/5
			208/4
			197/5
			199/5
			187/4
			Σ 201/5

* Випробування проводились клинками, обробленими по режимам термічної обробки з урахуванням досліджень на пружність, а саме: п690 – загартування $T = 1\ 100$ °C. Кріообробка 3 години, відпуск $T = 220$ °C – 1 година, твердість – 60-61 HRC.

Композит ШХ15Ш в обкладках 40X13:

Загартування $T = 840\text{ }^{\circ}\text{C}$, відпуск $T = 270\text{ }^{\circ}\text{C}$, тривалість – 2 години, твердість 58–59 HRC.

Приведемо деякі дефекти термічної обробки, від яких залежить структура вихідного матеріалу і відповідно механічні властивості (табл. 13).

Таблиця 13

Дефекти структуроутворення пов'язані з термічною обробкою [4]

Назва дефекту	Відображення на шліфі після травлення
Карбідна неоднорідність	Карбіди різні по розмірам та розподіленню по площині шліфа
Карбідна полосчастість	В місцях скупчення карбідів структура мартенситно-трооститна, а на ділянках з низьким вмістом карбідів присутній гольчастий мартенсит
Карбідна ліквація	Крупні включення карбідів об'єднані в сегрегації
Карбідна сітка	Крупні карбіди розподілені у вигляді сітки по площині шліфа



Рис. 1. Полосчастість в загартованій сталі ШХ15Ш $\times 3000$

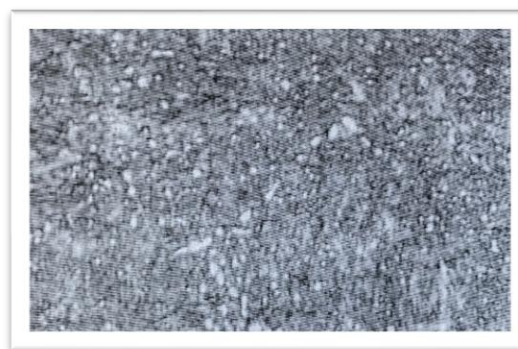


Рис. 2. Ділянка карбідної сітки в сталі ШХ15Ш (загартування відпуск) $\times 3000$

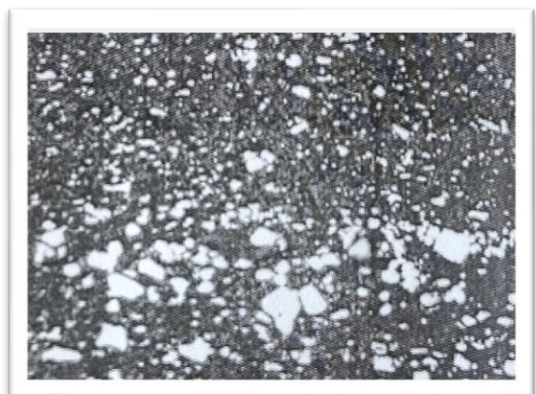


Рис. 3. Карбідна ліквація в сталі ШХ15Ш $\times 3000$

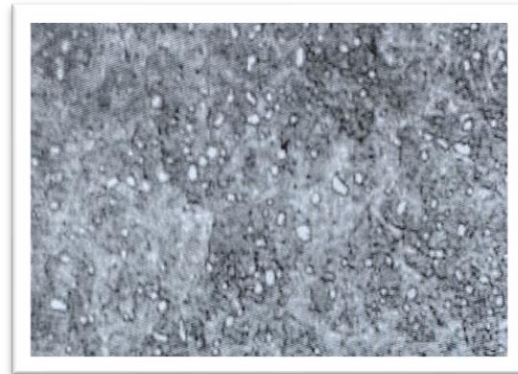


Рис. 4. Структура сталі ШХ15Ш з неоднорідно розмірними карбідами $\times 3000$

Наведемо приклади мікроструктур, які мають дефекти, пов'язані з неправильно призначеними режимами термічної обробки (рис. 1–4).

Приведемо приклад мікроструктур композиту та моносталі п690, термообробка яких виконана без порушення технологічної

схеми, по режимах (табл. 5, 9). Аналізуючи мікроструктури, можна зробити висновок про перевагу п690 над композитом ШХ15Ш в обкладках 40X13, за розподіленням та розміром карбідної складової, яка є основою зносостійкості (утримання ріжучої кромки) клинка ножа, але механічні властивості

нижчі в порівнянні з композитним клинком. Потрібна також додаткова операція термообробки, яка потребує високоякісного дорогого обладнання. Як наслідок вартість готового виробу значно вища ніж клинок з композитної сталі. Вагомим чинником також є вартість австрійської нержавійки в стані постачання.

Обладнання для проведення випробувань та досліджень, яке було використано в роботі:

1. Твердомір Роквелла HRA1 «Мікротех» BRAND
2. Муфельна піч HABERTHERM HTC 03/14 з відкидними дверцятами 3216-00006
- Оптичний мікроскоп AXIOVERT 200MAT.

Висновки

Після проведених випробувань на твердість, пружність, зносостійкість ріжучої кромки клинків, встановлені оптимальні режими термічної обробки для сталей.

1. Композитна сталь ШХ15Ш в обкладках 40X13:

загартування $T = 840\text{ }^{\circ}\text{C}$;
відпуск $T = 270\text{ }^{\circ}\text{C}$, дві години;
твердість 58–59 HRC.

Структура сталі після операції відпуску-дрібногольчастий відпущений мартенсит з дрібними карбідами рівномірно розподіленими по структурі.

2. Мартенситна моносталь п690:
загартування $T = 1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
відпуск $T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$, одна година;
твердість після кріообробки 60–61 HRC.

Структура після операції відпуску-мартенсит відпуску з різнорозмірними карбідами на основі (Cr, Mo, V, C), які нерівномірно розподілені по структурі.

Обов'язкове застосування кріообробки для клинків із сталі п690, що веде до збільшення зносостійкості ріжучої кромки на 12–15 % [12]. Дотримування режимів термопластичної та термічної обробки, для зменшення вірогідності виникнення дефектів структуроутворення, які негативно впливають на механічні властивості клинків. Слід зазначити, що термічна обробка, легування, різні види захисних поверхонь та пластична деформація позитивно впливають на комплекс механічних властивостей [13–15].

Виготовлення експериментальних клинків проводити тільки методом ручного кування, щоб нівелювати дефекти прокатного виробництва та позитивно впливати на формування мікроструктури, субструктури та кінцевої структури виробів. Після термічної обробки основними недоліками п690 є менші показники пружності клинка, додаткова складна операція термічної обробки (кріообробка), більше часу витрачається на кування заготовки(комплексне легування). Приріст зносостійкості клинка складає 12–15 % в порівнянні з композитним (ШХ15Ш в обкладках 40X13). Але композит виграє в показниках пружності, надійності, технологічності (можливість використання вторинної сировини), показники корозійної стійкості практично рівні з моносталлю. Тому незначна перевага в зносостійкості австрійської кобальтової нержавійки, нівелюється вищими механічними показниками композитного клинка, доступністю матеріалу, значно меншою вартістю готового виробу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бялік О. М., Черненко В. С., Писаренко В. М., Москаленко Ю. Н. Металознавство : підруч. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ : Політехніка, 2002. 384 с.
2. Галико А. В., Кузик О. В., Кропівний В. М., Кропівна А. В., Молокост Л. А. Матеріалознавство : навч. посіб. Кіровоград : КОД, 2015. 168 с.
3. Пчелінцев В. О., Дегула А. І. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів : навч. посіб. Суми : СумДУ, 2012. 247 с.
4. Бялік О. М., Кондратюк С. Є., Кіндрачук М. В., Черненко В. С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія. Київ : ВПІ ВПК Політехніка, 2006. 328 с.
5. ГОСТ № 51500-99. Ножі і кинджали мисливські. 1999.

6. Technical Specifications. URL: <https://www.us.bohler.com/en/>
7. Марочник стали і сплавів. URL: http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=207
8. ДСТУ 4738:007. Сталь конструкційна підшипникова. Діапазон розмірів 8-400.
9. LLC BOHLER UDDEHOLM UKRAINE. Suchkova str., 117, 51200, Novomoskovsk, Ukraine. Bestellinr Purchaser's order Prüfgegenstand/object of test Sheets made n690 Microclean.
10. ДСТУ 4738:007. Діапазон розмірів 8-220. Клас сталі : Корозостійка жароміцна.
11. Cryogenic Society of America. URL: <https://www.cryogenicsociety.org/>
12. Hlushkova D. B., Bagrov V. A., Saenko V. A., Volchuk V. M., Kalinin A. V., Kalinina N. E. CSA cryogenic treatment database of research articles America. Study of wear of the building-up zone of martensiteaustenitic and secondary hardening steels of the Cr–Mn–Ti system. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2023. № 2 (144). Pp. 105–109. URL: <https://doi.org/10.46813/2023-144-105>
13. 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. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022. № 4 (140). Pp. 125–130. URL: <https://doi.org/10.46813/2022-140-125>
14. Большаков Вад. И., Большаков В. И., Волчук В. М., Дубров Ю. И. 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>

REFERENCES

1. Byalik O.M., Chernenko V.S., Pisarenko V.M. and Moskalenko Y.N. *Metaloznavstvo : pidruchnyk, 2-he vydannya, pereroblene i dopovnene* [Metallurgy : textbook, 2nd edition, revised and supplemented]. Kyiv : Polytechnic Publ., 2002, 384 p. (in Ukrainian).
2. Galiko A.V., Kuzyk O.V., Kropivny V.M., Kropivna A.V. and Molokost L.A. *Materialoznavstvo : navchal'nyy posibnyk* [Materials Science : textbook]. Kirovograd : KOD Publ., 2015, 168 p. (in Ukrainian).
3. Pchelintsev V.O. and Degula A.I. *Mekhanichni vlastyvoli ta konstruktsiyna mitsnist' materialiv : navch. posib.* [Mechanical properties and structural strength of materials : textbook]. Sumy : SumDU PUBL., 2012, 247 p. (in Ukrainian).
4. Bialik O.M., Kondratyuk S.E., Kindrachuk M.V. and Chernenko V.S. *Strukturnyy analiz metaliv. Metalohrafiya. Fraktohrafiya* [Structural analysis of metals. Metallography. Fractography]. Kyiv : VPI VPK "Polytechnics", 2006, 328 p. (in Ukrainian).
5. *HOST № 51500-99. Nozhi i kyndzhaly myslyvs'ki* [GOST no. 51500-99. Hunting knives and daggers]. 1999. (in Ukrainian).
6. Technical Specifications. URL: <https://www.us.bohler.com/en/>
7. *Marochnyk staly i splaviv* [Steel and alloy grader]. URL: http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=207. Title from the screen. (in Ukrainian).
8. *DSTU 4738:007. Stal' konstruktsiyna pidshypnykova. Diapazon rozmiriv 8-400* [DSTU 4738:007. Structural bearing steel. Size range 8-400]. (in Ukrainian).
9. LLC BOHLER UDDEHOLM UKRAINE, Suchkova str., 117, 51200, Novomoskovsk, Ukraine Bestellinr Purchaser's order Prüfgegenstand/object of test Sheets made n690 Microclean.
10. *DSTU 4738:007. Diapazon rozmiriv 8-220 Klas stali : Korozostiyka zharomitsna* [DSTU 4738:007. Size range 8-220 Steel class : Corrosion-resistant, heat-resistant]. (in Ukrainian).
11. Cryogenic Society of America. URL: <https://www.cryogenicsociety.org/>
12. Hlushkova D.B., Bagrov V.A., Saenko V.A., Volchuk V.M., Kalinin A.V. and Kalinina N.E. CSA cryogenic treatment database of research articles America. Study of wear of the building-up zone of martensiteaustenitic and secondary hardening steels of the Cr–Mn–Ti system. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2023, no. 2 (144), pp. 105–109. URL: <https://doi.org/10.46813/2023-144-105>
13. 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. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022, no. 4 (140), pp. 125–130. URL: <https://doi.org/10.46813/2022-140-125>
14. Bolshakov 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 Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 12, pp. 45–48. (in Ukrainian). URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73434>

Надійшла до редакції: 14.02.2025.

УДК 69.05+004.94

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.58.1144

ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ У БУДІВЕЛЬНУ ГАЛУЗЬ

КУЛІК М. В.¹, *канд. техн. наук, доц.*,
ІВАНЕНКО Д. С.^{2*}, *асп.*,
БОЛЮК С. В.³, *ст. викл.*,
ЧЕЧЕЛЬ М. В.⁴, *ст. викл.*,
ГУНДРОВ Г. В.⁵, *магістрант*

¹ Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (099) 088-22-83, e-mail: starwarskmv4@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4880-5217

^{2*} Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (068) 528-67-86, e-mail: d.sergeevich108@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1635-1214

³ Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (096) 559-43-33, e-mail: bolyuksv@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4072-9018

⁴ Кафедра будівельного виробництва 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

⁵ Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (098) 413-39-19, e-mail: germangundrov1@gmail.com, ORCID ID: 0009-0007-7187-1603

Анотація. В умовах стрімкого розвитку сучасних технологій і зростаючих вимог до підвищення ефективності, якості та безпеки будівельного виробництва, впровадження роботизації та автоматизації на будівельних майданчиках стає перспективним напрямом. Використання роботів та автоматизованих систем дозволяє здійснювати широкий спектр завдань, починаючи від підготовки основи для будівництва, виконувати монтаж конструктивних елементів, що в майбутньому відкриває нові горизонти у зведенні житлових і промислових комплексів, сприяє оптимізації виробничих процесів та значно зменшує часові витрати. Автоматизація дає змогу мінімізувати вплив людського фактору, що є однією з ключових причин помилок у будівництві [1]. Використання роботів дозволяє підвищити точність виконання завдань, передбачених планом, при цьому забезпечуючи відповідність сучасним нормативним документам. Наукова робота спрямована на аналіз основних перспектив, викликів і технологічних рішень, пов'язаних із впровадженням автоматизованих систем у будівельній галузі. Розглядаються інноваційні підходи до автоматизації, вплив новітніх технологій на виконання будівельних робіт, а також можливості використання автономних систем для зведення житлових комплексів. Запропоновані висновки демонструють, що інтеграція автоматизованих систем є не лише ефективним інструментом для оптимізації витрат часу і ресурсів, але й потужним драйвером сталого розвитку будівельної індустрії в перспективі, а впровадження автоматизованих рішень на державному рівні дозволяє не лише відповідати сучасним тенденціям, але й створювати нові стандарти ефективності, якості та безпеки в будівництві.

Ключові слова: *автоматизація будівництва; інноваційні технології; інформаційне моделювання; управління будівництвом; оптимізація процесів; безпека на будівельному майданчику*

CHALLENGES AND PROSPECTS OF IMPLEMENTING AUTOMATED SYSTEMS IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

KULIK M.V.¹, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
IVANENKO D.S.^{2*}, *PhD Stud.*,
BOLYUK S.V.³, *Sen. Lect.*,
CHECHEL M. V.⁴, *Sen. Lect.*,
HUNDROV H.V.⁵, *Master*

¹ Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskoho Str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (099) 088-22-83, e-mail: starwarskmv4@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4880-5217

^{2*} Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskoho Str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (068) 528-67-86, e-mail: d.sergeevich108@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1635-1214

³ Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskoho Str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (96) 559-43-33, e-mail: bolyuksv@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4072-9018

⁴ Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskoho Str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (099) 619-17-77, e-mail: chechel@zp.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9462-9560

⁵ Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskoho Str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (098) 413-39-19, e-mail: germangundrov1@gmail.com, ORCID ID: 0009-0007-7187-1603

Abstract. In the context of rapid technological advancements and increasing demands for enhanced efficiency, quality, and safety in construction, the implementation of robotics and automation on construction sites has become a promising direction. The use of robots and automated systems enables a wide range of tasks, from preparing the foundation for construction to assembling structural elements, thereby opening new horizons for the development of residential and industrial complexes, optimizing production processes, and significantly reducing time costs. Automation minimizes the impact of the human factor, which is one of the key causes of errors in construction [1]. Utilizing robots enhances the accuracy of tasks outlined in the plan while ensuring compliance with modern regulatory standards. This research focuses on analyzing the key prospects, challenges, and technological solutions associated with the implementation of automated systems in the construction industry. It explores innovative approaches to automation, the impact of emerging technologies on construction activities, and the potential use of autonomous systems in the development of residential complexes. The proposed conclusions demonstrate that integrating automated systems is not only an effective tool for optimizing time and resource expenditures but also a powerful driver of sustainable development in the construction industry. Moreover, implementing automated solutions at the state level allows not only keeping up with modern trends but also establishing new standards of efficiency, quality, and safety in construction.

Keywords: *automation in construction; innovative technologies; building information modeling; construction management; process optimization; safety on construction sites*

Вступ. Будівельна галузь сьогодні є однією з найбільш динамічних та інвестиційно привабливих сфер, яка демонструє постійне зростання, особливо у контексті післявоєнної відбудови. Успішність цієї галузі значною мірою залежить від здатності адаптуватися до нових викликів, таких як складність проєктів, підвищення вимог замовників до термінів виконання і якості робіт в умовах невизначеності. У цьому контексті роботизація та автоматизація стають стратегічними напрямками для розвитку в найближчі десятиліття.

Сучасні автоматизовані системи відкривають нові можливості для оптимізації будівельних процесів [2]. Наприклад, роботи дозволяють виконувати різноманітні завдання з високою точністю, мінімізуючи вплив людського фактору та знижуючи ризик помилок. Використання роботизованих технологій дозволяє значно прискорити будівництво об'єктів, підвищити якість робіт і забезпечити

стабільність навіть за умов високої складності проєктів.

Переваги автоматизації очевидні: роботизовані системи працюють майже безперервно, зберігаючи стабільну продуктивність, не потребують довгострокових перерв чи відпочинку (оформлення лікарняних, відпусток), а також можуть працювати в умовах, небезпечних для людини, що особливо важливо в умовах відбудови міст або масштабних інфраструктурних проєктів.

Автоматизація також сприяє економії ресурсів і часу в перспективі. Інтеграція новітніх технологій у будівництво дозволяє створити системи, які оптимізують витрати, забезпечують відповідність сучасним стандартам і підвищують безпеку робочих процесів. У результаті автоматизація не лише підвищує ефективність галузі, але й створює нові стандарти якості, якщо розглянути це питання на державному рівні.

Таким чином, автоматизація та роботизація будівельного виробництва

стають невід'ємною частиною майбутнього галузі.

Мета статті – аналіз перспектив і викликів, пов'язаних із впровадженням автоматизованих систем у будівельному виробництві, дослідження їх впливу на оптимізацію процесів, зниження впливу людського фактору та підвищення ефективності будівельних робіт.

Методологія дослідження базується на аналізі сучасних наукових джерел, що висвітлюють впровадження різних автоматизованих систем у будівництві, їх вплив на зниження людського фактору, підвищення ефективності, якості та безпеки будівельних процесів. Використано підхід, що поєднує теоретичний аналіз і вивчення практичних кейсів застосування інноваційних технологій і виявлення драйверів для їх інтеграції на державному рівні.

Стан проблеми та цілі дослідження. Автоматизація будівельних процесів є одним з найактуальніших напрямів розвитку сучасної будівельної галузі, оскільки вона сприяє значному підвищенню ефективності, якості та безпеки будівельних робіт. Швидке впровадження інноваційних технологій обумовлене зростаючими вимогами ринку до скорочення термінів виконання робіт, оптимізації витрат і мінімізації людського фактору, що знижує ризик помилок і травматизму. В свою чергу, роботизація будівельних процесів відкриває нові можливості для підвищення продуктивності, точності та безпеки будівельних робіт, а сучасні конструкції роботів адаптовані для виконання широкого спектра завдань у будівництві, що забезпечує ефективне виконання технологічних операцій навіть у складних умовах [3].

У цьому контексті особливу увагу привертають дослідження, які аналізують інтеграцію роботизації з інформаційним моделюванням будівель, адже ця комбінація відкриває нові горизонти для автоматизації управління проектами, скорочення витрат і підвищення продуктивності. Таким чином, автоматизація стає не лише технологічною потребою, а й стратегічним інструментом

для забезпечення сталого розвитку будівельної галузі.

Наукова література свідчить про активний розвиток автоматизації та роботизації в будівельній галузі. Зокрема, у дослідженні Taghaddos H., Mashayekhi A. та Sherafat B. розглядається вплив впровадження автоматизованих систем на виконання кількісного аналізу обсягів будівництва. Автори відзначають, що використання інформаційного моделювання будівель значно спрощує планування, скорочує час виконання завдань та мінімізує ризики людських помилок. Такі системи надають можливість здійснювати детальні розрахунки ресурсів та створювати цифрові моделі будівель із високою точністю [4].

Lin Y.-W., Tang T. L. E., Sangiovanni-Vincentelli A., Schiavon S., та Spanos C. J. у своїй роботі зосередили увагу на інтеграції електронного проектування та будівельного моделювання. Автори підкреслюють, що поєднання інноваційних підходів до проектування із BIM-технологіями сприяє зменшенню витрат, підвищенню продуктивності та покращенню якості реалізації будівельних проектів. Вони акцентують увагу на необхідності цифрової трансформації як ключового фактору для адаптації будівельної галузі до сучасних вимог [5].

Дослідження Броннікова А. І., Коломійця А. І. та Юрченка О. І. присвячене розробці систем автоматизації, орієнтованих на контроль та моніторинг роботи промислових приміщень. Впроваджені системи дозволяють знизити залежність від людського впливу та фактору, підвищити точність виконання завдань та забезпечити контроль якості на кожному етапі виробничого процесу, що сприятиме вдосконаленню управління ресурсами та підвищенню загальної ефективності виробництва [6].

Науковці Іваненко Д. С., Кулік М. В., Бобраков А. А. у своїй роботі [7] зазначають, що використання BIM-технологій як основи для управління будівельними проектами забезпечує ефективну координацію між учасниками

процесу, значно скорочує час виконання завдань та оптимізує розподіл ресурсів, отже ці аспекти мають ключове значення у впровадженні інноваційних технологій автоматизації будівельного виробництва.

Попри значний потенціал, впровадження роботизованих систем потребує високих інвестицій та адаптації сучасної нормативно-правової бази. Для української будівельної галузі ключовими бар'єрами є висока вартість обладнання та брак фахівців, які здатні працювати з такими системами. Утім, адаптація BIM-технологій та роботизованих систем може стати вирішальним кроком для досягнення конкурентоспроможності на міжнародному ринку, особливо у контексті відбудови міст.

Розглядаючи застосування робототехніки у будівельній галузі, варто врахувати досвід впровадження роботизованих систем у промисловості зарубіжних країн. Дослідження Skibniewski, Golparvar-Fard і Bock [8] вказують на те, що робототехніка зосереджена в окремих регіональних хабах, створюючи значну нерівномірність у розподілі доступу до технологій. Такий підхід може обмежувати потенціал інноваційного розвитку в менш забезпечених районах, а для вирішення цієї проблеми важливо розробляти інтеграційні стратегії, які сприятимуть поширенню автоматизації на національному рівні, підвищуючи ефективність і якість будівельних процесів незалежно від їхнього географічного розташування.

Аналіз літературних джерел показує, що впровадження сучасних систем автоматизації у будівельну галузь має значний потенціал для підвищення ефективності, продуктивності та якості будівельних процесів. Автоматизація значно зменшує ризик помилок і підвищує рівень безпеки на будівельних об'єктах, мінімізуючи залежність від людського втручання. Разом із цим, сучасні дослідження наголошують на важливості модернізації освітніх програм для підготовки спеціалістів, здатних ефективно інтегрувати та використовувати робототехнічні системи у будівельних

процесах, що підкреслює актуальність зазначеної тематики.

Виклад основного матеріалу. Значний внесок у розвиток автоматизації будівельного виробництва здійснили компанії Японії, Австралії та США, які не лише впроваджують роботизовані системи у будівельні процеси, але й створюють нові стандарти організації робіт, що базуються на передових технологіях та інноваційних підходах.

Японська компанія Kashima вирізняється своїм інтегрованим підходом до вирішення таких ключових викликів галузі, як дефіцит кваліфікованої робочої сили, складність будівельних умов і низький рівень продуктивності праці, що традиційно притаманний будівельному сектору. У рамках своєї стратегії компанія розробляє робототехнічні рішення, які базуються на інформаційних та комунікаційних технологіях, спрямованих на цифровізацію усіх етапів будівельного циклу, включаючи проектування, моніторинг та виконання будівельних робіт. Компанія розробила систему автоматизованого будівництва A4CSEL, яка дозволяє керувати декількома автоматизованими будівельними машинами з мінімальною участю працівників, перетворюючи будівельний майданчик на фабрику [9].

Kashima активно працює над створенням інструментів для віддаленого управління будівельними проектами, що передбачає повну інтеграцію цифрових технологій з автоматизованими системами управління, які дозволяють у реальному часі контролювати хід виконання робіт, виявляти потенційні проблеми та коригувати їх без затримок.

Згідно з останнім оглядом «Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies» за 2023 рік, кілька ключових технологічних інновацій, таких як штучний інтелект (AI), блокчейн, роботизація та автоматизація, набирають обертів, змінюючи підходи до виконання будівельних робіт і сприяючи оптимізації виробничих процесів. Відображено етапи розвитку технологій, від їх появи до стабільного впровадження в реальні умови

(рис. 1). Особливу увагу приділено трансформації традиційних будівельних процесів і підвищення їх ефективності [10].

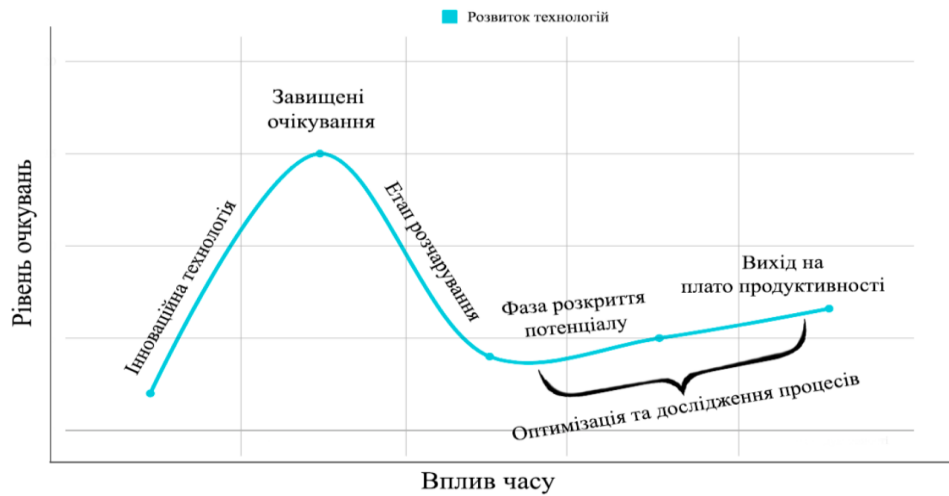


Рис. 1. Представлена крива популярності технологій

Австралійська компанія Fastbrick Robotics, у свою чергу, орієнтується на автоматизацію процесів у малоповерховому будівництві, використовуючи роботів для автоматизованого укладання цегли, а сама технологія забезпечує значне скорочення часу будівництва, що, у поєднанні з високою точністю виконання робіт, стає ключовим фактором її конкурентоспроможності [11].

Впровадження автоматизованих систем у будівництві значно змінює підхід до виконання проєктів, забезпечуючи підвищення швидкості реалізації завдань та точності їх виконання, при цьому зазначені трансформації стають можливими завдяки синхронізації робототехнічних рішень з технологіями інформаційного моделювання будівель, що створює унікальні можливості для ефективного планування та управління будівельними процесами.

Автоматизовані системи впливають на швидкість виконання проєктів через оптимізацію технологічних операцій і усунення простоїв. Використання роботів для монтажу конструктивних елементів чи виконання оздоблювальних робіт дозволяє значно скоротити часові витрати, оскільки роботи виконують завдання безперервно, із постійною продуктивністю. Це, у свою чергу, мінімізує вплив людського фактору, який часто є причиною затримок через

потребу у відпочинку чи обмеження фізичних можливостей працівників.

Сучасні автоматизовані системи виконують широкий спектр завдань: від підготовки основи для будівництва до монтажу конструктивних елементів та оздоблювальних робіт. Вони базуються на використанні робототехніки, програмного забезпечення для управління будівельними процесами та сенсорних технологій, які забезпечують високу точність виконання операцій. Наприклад, роботи, оснащені системами машинного зору, можуть здійснювати точне позиціонування елементів на основі даних з BIM-моделі, що мінімізує ймовірність помилок і прискорює процес монтажу.

Одним із найбільш суттєвих обмежень для впровадження автоматизованих систем в будівельну галузь України виступають значні початкові капіталовкладення, необхідні для придбання обладнання, розробки програмного забезпечення та створення інфраструктури. Створюється фінансовий бар'єр, котрий поглиблюється недостатнім рівнем інвестицій у дослідження та розробки.

Недостатня кількість кваліфікованих фахівців, здатних працювати з сучасними технологіями, формує ще одну суттєву перешкоду, яка загострюється через нерозвинену систему професійної

підготовки та брак належного кадрового потенціалу. Фрагментована структура будівельної галузі, де координація між учасниками процесу залишається на низькому рівні, додатково гальмує інтеграцію автоматизованих систем, створюючи прогалини у спільному використанні інновацій. Зазначений аспект можливо вирішити шляхом впровадження в освітні програми закладів вищої освіти відповідних освітніх компонентів при взаємодії з роботодавцями.

Технологічна незрілість деяких рішень, включаючи недостатню функціональну інтеграцію, обмеження алгоритмічної ефективності та труднощі роботи в

неконтрольованих середовищах, значно знижує довіру до таких систем, особливо серед підприємств, що прагнуть мінімізувати ризики.

Водночас кожна із цих перешкод може бути подолана завдяки впровадженню державних стимулів, створенню кластерів для координації, збільшенню фінансування інновацій, розвитку освітніх програм і технологічному вдосконаленню, а викладені рішення (табл.) окреслюють реалістичні часові рамки для подолання цих викликів, формуючи стратегічний план дій для ефективної трансформації будівельної галузі.

Таблиця

Проблеми, сутність та рішення для інтеграції автоматизованих систем

Проблема	Суть	Можливе рішення	Ймовірні строки
Високі початкові капіталовкладення	Значні витрати на придбання обладнання, програмного забезпечення та інфраструктури	Державні субсидії, програми співфінансування та пільгове кредитування для бізнесу	3–5 років за умов наявності державної підтримки
Фрагментована структура будівельної галузі	Відсутність належної координації між учасниками будівельного процесу	Створення галузевих кластерів для об'єднання ресурсів та координації дій	2–3 роки для створення початкових кластерів
Низькі інвестиції в наукові дослідження	Недостатнє фінансування інноваційних проєктів у будівництві	Збільшення державних та приватних інвестицій у дослідження й розробки	5–7 років для досягнення фінансування
Недостатня підготовка кваліфікованих кадрів	Брак фахівців, здатних працювати з автоматизованими системами	Розробка спеціалізованих навчальних програм та співпраця з університетами	3–5 років для впровадження навчальних програм
Недосконалість технологій	Технології знаходяться на стадії тестування або мають обмежену функціональність	Інвестування в доопрацювання технологій і тестування в реальних умовах	4–6 років для технологічного розвитку

Проаналізувавши наведені виклики та ключові бар'єри впровадження автоматизованих систем у будівництві, була розроблена багаторівнева модель інтеграції (рис. 2), котра забезпечує взаємодію економічного, організаційного, технологічного, кадрового та нормативно-правового рівнів, формуючи єдину платформу для впровадження інноваційних рішень. У центрі моделі — інтеграція автоматизованих систем і BIM, яка об'єднує всі рівні. Від кожного рівня йде взаємозв'язок із центральною платформою, що забезпечує двосторонню взаємодію між рівнями.

Впровадження розробленої моделі спрямоване на оптимізацію будівельних процесів через зменшення впливу людського фактору, підвищення точності та прискорення виконання завдань, що стає можливим завдяки синхронізації дій на зазначених рівнях, а також забезпечує системність та адаптивність запропонованих рішень до умов українського будівельного ринку, враховуючи сучасні виклики, пов'язані з післявоєнною відбудовою та зростаючими вимогами до ефективності, якості та безпеки.

Серед перешкод слід відзначити потребу у значних фінансових ресурсах для

створення відповідної інфраструктури, міжрівневому рівні та доопрацювання координацію учасників процесу на окремих технологічних рішеннях [12].



Рис. 2. Модель подолання зазначених викликів та цифровізація будівельної галузі

Адаптація існуючих організаційних структур до впровадження сучасних технологій вимагає не лише часу, але й глибоких трансформацій у внутрішніх процесах, що нерідко викликає супротив серед працівників і менеджменту. Невирішеним питанням залишається також створення оновленої нормативно-правової бази, яка б не лише регулювала застосування штучного інтелекту у будівництві, але й забезпечувала відповідність таких технологій сучасним стандартам якості та безпеки. Наведені аспекти мають бути вирішені для розробки стратегій інтеграції автоматизованих рішень, оскільки вони впливають на можливість оптимізації ресурсів, підвищення продуктивності та створення умов для сталого розвитку галузі [13].

Висновки

Проведений аналіз демонструє, що автоматизація у будівельній галузі є не лише інструментами для підвищення

продуктивності, але й ключовими елементами формування нових стандартів якості, безпеки та ефективності.

На тлі глобальних технологічних тенденцій, Україна має значні можливості для адаптації новітніх технологій у будівельній сфері. Проте для цього необхідно створити умови для розвитку інфраструктури, сприятливого законодавчого середовища та надання підтримки дослідженням у цій галузі. Важливим є забезпечення навчання і підвищення кваліфікації фахівців, які будуть здатні ефективно працювати з новими технологіями, такими як штучний інтелект і робототехніка.

Разом із тим, успішне впровадження таких технологій передбачає необхідність вирішення низки суттєвих викликів, серед яких особливе значення має нерівномірний доступ до автоматизованих систем, що спостерігається у різних країнах і обмежує можливості їх ефективного використання, а також дефіцит кваліфікованих кадрів.

У цьому контексті дослідження важливу роль відіграє адаптація навчальних програм в закладах вищої освіти, які повинні враховувати потреби сучасного будівництва, інтеграція інформаційного моделювання будівель, що дозволить підвищити кількість кваліфікованих фахівців галузі в умовах глобалізації [14].

Розроблена багаторівнева модель інтеграції автоматизованих систем у будівельне виробництво покликана створити основу для подолання ключових викликів галузі шляхом, пропонуючи комплексний підхід до оптимізації використання ресурсів, мінімізації впливу людського фактору та впровадження інноваційних технологій. У перспективі модель має стати важливим інструментом для реалізації інтеграції автоматизованих систем до будівельних компаній України.

В свою чергу, міжнародний досвід доводить, що впровадження сучасних систем автоматизації у будівельну галузь

дозволяє не лише подолати існуючі виклики, пов'язані з нестачею робочої сили та складністю виконання будівельних завдань, але й створити передумови для подальшого напрямку розвитку галузі.

Тема автоматизації та інтеграції сучасних технологій у будівельну галузь, є надзвичайно перспективною, але водночас потребує поглибленого наукового осмислення, яке має включати як фундаментальні дослідження, так і практичну апробацію запропонованих рішень у реальних умовах. Особливої уваги заслуговує розробка методологічних підходів до оцінки ефективності впроваджених інновацій, аналіз їхнього довгострокового впливу на продуктивність галузі, а також вивчення адаптаційних механізмів для інтеграції автоматизованих систем. Подальший розвиток цієї тематики стане вагомим внеском у формування нових стандартів ефективності та забезпечить розвиток будівельної індустрії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Іванов Ю. В., Вергал К. Ю., Дзеверіна К. С. Впровадження автоматизації та елементів інформаційної логістики в будівельній галузі. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія : Економіка і управління*. 2024. Т. 35, № 3. С. 8–13.
2. Семененко Ю. С. Оптимізація діяльності будівельної компанії з допомогою ІТ технологій. *Економічний аналіз*. 2024. Т. 34, № 2. С. 250–258.
3. Міщук Д. О. Огляд та аналіз конструкцій роботів для будівельних робіт. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2013. Вип. 82. С. 28–37. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/gbdtmm_2013_82_7 (дата звернення : 18.12.2024).
4. Taghaddos H., Mashayekhi A., Sherafat B. Automation of Construction Quantity Take-Off. *Using Building Information Modeling (BIM)*. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1906.02400.
5. Lin Y.-W., Tang T. L. E., Sangiovanni-Vincentelli A., Spanos C. J. From Electronic Design Automation to Building Design Automation. *Challenges and Opportunities*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2305.06380.
6. Бронніков А. І., Коломієць А. І., Юрченко О. Д. Система автоматизації для моніторингу роботи приладобудівного приміщення. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 19–30.
7. Іваненко Д. С., Кулік М. В., Бобраков А. А., Москальова А. В. BIM як база для механізму управління будівельними проектами. *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2022. № 42. DOI: 10.31713/budres.v0i42.020.
8. Skibniewski M., Golparvar-Fard M., Bock T. Robot Hubs : The Skewed Distribution of Robots in US Manufacturing. *AEA Papers and Proceedings*. May 2023. Vol. 12, iss. 3. Pp. 215–218.
9. Kajima Corporation. A4CSEL : Automated Construction System for Civil Engineering and Large-scale Construction. URL: https://www.kajima.co.jp/english/tech/c_a4csel/engineering/index.html. (дата звернення : 15.12.2024).
10. Gartner. What's New in the 2023 Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies. URL : <https://www.gartner.com/en/articles/what-s-new-in-the-2023-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies> (дата звернення : 22.12.2024).
11. FBR Ltd. Hadrian X. URL: <https://www.fbr.com.au/view/hadrian-x?> (дата звернення : 29.12.2024).
12. Ічетовкін А. О. Аналіз механізму вибору організаційно-технологічних рішень інтегрованого управління будівельними процесами. *Наука та прогрес транспорту*. 2023. № 4 (104). С. 39–47. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2023/297519>

13. Доненко В. І., Бобраков А. А., Іваненко Д. С. Удосконалення ресурсозабезпечення при відновленні будівель з використанням Artificial Intelligence. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2023. № 1 (52). С. 62–72. URL: <http://ways.knuba.edu.ua/article/view/297637>

14. Петренко О. В., Коваленко Л. С. Роль технологій будівельного інформаційного моделювання в адаптації сучасних навчальних програм для будівельної галузі. *Вісник Львівської політехніки. Серія : Архітектура*. 2024. № 6 (2). С. 45–52. URL: <https://doi.org/10.23939/sa2024.02.087>

REFERENCES

1. Ivanov Yu.V., Vergal K.Yu. and Dzeverina K.S. *Vprovadzhennya avtomatyzatsiyi ta elementiv informatsiynoi lohistyky v budivel'niy haluzi* [Implementation of automation and elements of information logistics in the construction industry]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernads'koho. Seriya : Ekonomika i upravlinnya* [Scientific Notes of TNU named after V.I. Vernadsky. Series : Economics and Management]. 2024, vol. 35, no. 3, pp. 8–13. (in Ukrainian).

2. Semenenko Yu.S. *Optymizatsiya diyal'nosti budivel'noyi kompaniyi z dopomohoyu IT tekhnolohiy* [Optimization of construction company activities using IT technologies]. *Ekonomichnyy analiz* [Economic Analysis]. 2024, vol. 34, no. 2, pp. 250–258. (in Ukrainian).

3. Mishchuk D.O. *Ohlyad ta analiz konstruksiy robotiv dlya budivel'nykh robit* [Review and analysis of robot designs for construction works]. *Hirnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny* [Mining, Construction, Road, and Reclamation Machines]. 2013, no. 82, pp. 28–37. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/gbdmm_2013_82_7 (access date: 18.12.2024). (in Ukrainian).

4. Taghaddos H., Mashayekhi A. and Sherafat B. Automation of Construction Quantity Take-Off : Using Building Information Modeling (BIM). 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1906.02400.

5. Lin Y.-W., Tang T.L.E., Sangiovanni-Vincentelli A. and Spanos C.J. From Electronic Design Automation to Building Design Automation : Challenges and Opportunities. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2305.06380.

6. Bronnikov A.I., Kolomiyets A.I. and Yurchenko O.D. *Systema avtomatyzatsiyi dlya monitorynhu roboty pryladobudivnoho prymyshchennya* [Automation system for monitoring the operation of an instrument-making facility]. *Suchasnyy stan naukovykh doslidzhen' ta tekhnolohiy v promyslovosti* [Modern State of Scientific Research and Technologies in Industry]. 2024, no. 4 (30), pp. 19–30. (in Ukrainian).

7. Ivanenko D.S., Kulik M.V., Bobrakov A.A. and Moskalova A.V. *BIM yak baza dlya mekhanizmu upravlinnya budivel'nyimi proyektamy* [BIM as a basis for the mechanism of construction project management]. *Resursoekonomni materialy, konstruksiyi, budivli ta sporudy* [Resource-Efficient Materials, Structures, Buildings, and Facilities]. 2022, no. 42. DOI: 10.31713/budres.v0i42.020. (in Ukrainian).

8. Skibniewski M., Golparvar-Fard M. and Bock T. Robot Hubs : The Skewed Distribution of Robots in US Manufacturing. *AEA Papers and Proceedings*. May 2023, vol. 12, iss. 3, pp. 215–218.

9. Kajima Corporation. A4CSEL : Automated Construction System for Civil Engineering and Large-scale Construction. URL: https://www.kajima.co.jp/english/tech/c_a4csel/engineering/index.html (access date : 15.12.2024).

10. Gartner. What's New in the 2023 Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies. URL: <https://www.gartner.com/en/articles/what-s-new-in-the-2023-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies> (access date : 22.12.2024).

11. FBR Ltd. Hadrian X. URL: <https://www.fbr.com.au/view/hadrian-x> (access date : 29.12.2024).

12. Ichetovkin A.O. *Analiz mekhanizmu vyboru orhanizatsiyno-tekhnolohichnykh rishen' intehrovanoho upravlinnya budivel'nyimi protsesamy* [Analysis of the mechanism for selecting organizational and technological solutions for integrated management of construction processes]. *Nauka ta prohres transportu* [Science and Transport Progress]. 2023, no. 4 (104), pp. 39–47. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2023/297519> (in Ukrainian).

13. Donenko V.I., Bobrakov A.A. and Ivanenko D.S. *Udoskonalennya resursozabezpechennya pry vidnovlenni budivel' z vykorystannyam Artificial Intelligence* [Improvement of resource provision in building reconstruction using Artificial Intelligence]. *Shlyakhy pidvyshchennya efektyvnosti budivnytstva* [Ways to Improve Construction Efficiency]. 2023, no. 1 (52), pp. 62–72. URL: <http://ways.knuba.edu.ua/article/view/297637> (access date : 18.12.2024). (in Ukrainian).

14. Petrenko O.V. and Kovalenko L.S. *Rol' tekhnolohiy budivel'noho informatsiynoho modelyuvannya v adaptatsiyi suchasnykh navchal'nykh prohram dlya budivel'noyi haluzi* [The role of building information modeling technologies in the adaptation of modern educational programs for the construction industry]. *Visnyk L'vivskoyi politekhniki. Seriya : Arkhitektura* [Bulletin of Lviv Polytechnic. Series : Architecture]. 2024, no. 6 (2), pp. 45–52. URL: <https://doi.org/10.23939/sa2024.02.087> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.02.2025.

УДК 539.3:624.07

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.67.1145

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙ ЛОКАЛІЗАЦІЇ В ЕЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ПЛИННОСТІ

ЛАБІБОВ Р. Р.^{1*}, *здоб.*,

ХОДАНЕН Т. В.², *канд. ф.-м. наук, доц.*

^{1*} Кафедра теоретичної та комп'ютерної механіки, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Науки, 72, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: postrediori@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8535-2424

² Кафедра теоретичної та комп'ютерної механіки, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Науки, 72, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: thod7474@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9194-3634

Анотація. Постановка проблеми. З даних експериментальних досліджень відомо, що перехід від пружного стану до стану пластичності відбувається в усьому об'ємі зразка не одночасно, а поступово. При цьому в матеріалі виникають дві області з різними механічними властивостями та певною границею між ними, яка розповсюджується з визначеною швидкістю. Для опису цього процесу використано аналітичну модель поведінки матеріалу в умовах плинності, що включає гіпотезу про зв'язок поведінки матеріалу на піку-зубі на початку пластичної течії та подальшого різкого падіння напружень із вивільненням дислокацій. **Мета.** За допомогою чисельних методів продемонструвати, що використана теорія пластичності дозволяє моделювати в матеріалі повільну хвилю, що визначає рух фронту пластичної деформації. Отримати чисельні результати для таких конструкційних елементів як балки під дією згинального моменту та труби під дією внутрішнього тиску. **Методика.** Для досліджень стану пластичності з наведеними особливостями була реалізована чисельна модель у пакеті SIMULIA Abaqus Learning Edition. Однією з переваг цього програмного пакету є можливість задавати поведінку нестандартних матеріалів, зокрема було обрано матеріал з кусково-лінійною діаграмою напружень-деформацій, яка має низхідні ділянки, що відповідає процесу деформаційного розм'якшення. Інша особливість чисельного моделювання процесу локалізації зумовлена потребою врахування неоднорідності напружено-деформованого стану моделі. Для цього у розрахункову сітку скінчених елементів моделі було додано спеціальний елемент зі зниженою межею плинності, порівняно з рештою вузлів. **Практичні результати.** Запропонований підхід дозволяє описувати поведінку конструкційних елементів різної форми, які виготовлені з матеріалів із майданчиком плинності, та надавати оцінку їхньої поведінки у стані пластичності та прогнозувати втрату стійкості.

Ключові слова: *пластична деформація; межа плинності; смуги Людерса; фронт локалізації пластичної деформації*

NUMERICAL MODELLING OF PLASTICITY LOCALIZATION IN STRUCTURAL ELEMENTS DURING YIELDING

LABIBOV R.R.^{1*}, *Appl.*,

KHODANEN T.V.², *Cand. Sc. (Phys.-Math.), Sen. Lect.*

^{1*} Department of Theoretical and Computational Mechanics, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Nauky ave., Dnipro, 49000, Ukraine, e-mail: postrediori@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8535-2424

² Department of Theoretical and Computational Mechanics, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Nauky ave., Dnipro, 49000, Ukraine, e-mail: thod7474@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9194-3634

Abstract. Problem statement. Experimental data shows that during progression of state of plasticity across a specimen doesn't occur simultaneously and it is a gradual process. A specimen divides into two volumes where the material possesses different mechanical states and there is a well-observed boundary between them that protrudes through a specimen with a specific velocity. This publication describes a numerical model of material's behavior using numerical methods. To achieve this analytical model of yielding material is formulated that includes a hypothesis of connection between state on plastic tooth-peek and consequent decrease of strain with release of dislocations. **Research purpose.** Use a numerical package tool to demonstrate that the plasticity theory used allows modeling a slow plasticity wave in a material. Obtain numerical modelling results for such construction elements as beams deformed by a bending moment and pipes under internal pressure. **Methodology.** In order to simulate plastic state with the aforementioned peculiarities a finite element model was created in SIMULIA Abaqus Learning Edition package. One of the advantages

of this software is an ability to formulate behavior of materials with non-standard properties, in particular a material with stress-strain diagram defined as a piece-wise curve that has segments of descending stresses to account for strain-softening during plasticity. Another point is the fact that plasticity localization requires a non-uniform state of the model to account for the observation that localization starts in the vicinity of local imperfections in the crystalline structure. In order to implement this effect and initiate localization bands in the defined area of the model, one of the elements of the finite element lattice is set to represent an imperfection by having a decreased yielding limit relative to the rest of the nodes. **Conclusions.** The described approach allows creation of comprehensive models of construction elements of different shape made with a material with a yielding plateau, and evaluate behavior during plasticity phase and made assumptions about loss of stability.

Keywords: plastic deformation; yielding limit; Lüders bands; plasticity localization boundary

Вступ. Механіка матеріалів з майданчиком плинності, для яких притаманне явище локалізації пластичної деформації, є галуззю, що розвивається з 1960-х рр. Теоретичні та експериментальні дослідження цього класу матеріалів нададуть змогу визначати нові сфери їх застосування. Актуальність таких досліджень зумовлена й вимогами до сучасних технічних рішень, зокрема щодо підвищеної стійкості до знакозмінних і вібраційних навантажень, більшої здатності до пластичної деформації без руйнування, ніж у матеріалів, що зазвичай використовуються для забезпечення міцності та цілісності конструкцій. Саме наявність двох стійких форм рівноваги та візуально помітного настання пластичної течії надало змогу знайти широке використання цим матеріалам в таких галузях як супутникобудування, медичні технології, конструювання датчиків. До таких матеріалів відносяться, наприклад, матеріали з пам'яттю форми, наприклад, нітінол (нікелід титану NiTi) та сплави на основі нікелю і марганцю (FeNiCoAl, CuAlMn, FeMnAlNi).

У будівельній галузі клас матеріалів з майданчиком плинності використовується, починаючи з 1990-х рр. Ці матеріали, незважаючи навіть на їхню низьку, порівняно зі сталями, несучу здатність, мають такі особливості як стійкість до періодичних, знакозмінних навантажень, вібрацій, легкість, корозійну стійкість, набагато більшу межу руйнування в стані пластичності, що дозволяє використовувати їх у сценаріях, пов'язаних з реконструкцією та запобіганням ризикам.

Аналіз публікацій. У ряді експериментів показано як розвиток смуг локалізації в тілі під дією навантаження відбувається в стані плинності [1–3]. В експериментальних роботах [4; 5] показано, що смуга локалізації поширюється в тілі з деякою визначеною постійною швидкістю V . В [6] дається оцінка швидкості, отримана з аналітичного розв'язку. Однак такий розв'язок описує поведінку тільки окремого класу матеріалів, для яких на діаграмі напружень-деформацій матеріалу існують тільки стани пружності та зміцнення.

У сталі та зазначених вище сплавах, використовуваних на практиці, смуга локалізації розвивається у вигляді смуги зсуву між структурними шарами [7; 8] (шарами атомів у кристалічній решітці, шарами зерен та ін.) Відома певна аналогія розвитку лінії локалізації з процесом утворення тріщини II типу [9]: наявність стрибка поперечних переміщень V , що виникають на берегах тріщини і смуг локалізації дотичних напружень. Однак лінія локалізації має ряд особливих властивостей, таких як можливість закриття («заліковування») через оборотний характер зсуву структурної решітки.

Опис моделі. Для моделювання механізму розвитку смуг Людерса у матеріалі з майданчиком плинності, який складається з фериту із включеннями суттєво більш міцного перліту, розглядається зсув двох сусідніх зерен перліту і фериту на відстань η під впливом сили T [1]. Прийmemo в зерні фериту модель пружно-пластичної поведінки, а в зерні перліту модель крихкого руйнування. Таким чином можна охарактеризувати

залежність дотичних напружень τ ($\tau = T / \delta$) від деформації зсуву γ ($\gamma = \eta / \delta$) між двома зернами моделлю Новожилова для утворення тріщини в пружному тілі [11]:

$$\tau = G(\gamma / \gamma_C) \exp(-\gamma / \gamma_C) + \tau_0(1 + a\gamma / \gamma_C)[1 - \exp(-\gamma / \gamma_C)], \quad (1)$$

де γ_C – деформація на межі міцності на зсув:

$$\gamma_C = G \exp(-1) + \tau_0(1 + a)[1 - \exp(-1)].$$

Перший доданок в співвідношенні (1) відповідає за руйнування зерна перліту, а другий – за пружно-пластичні деформації фериту.

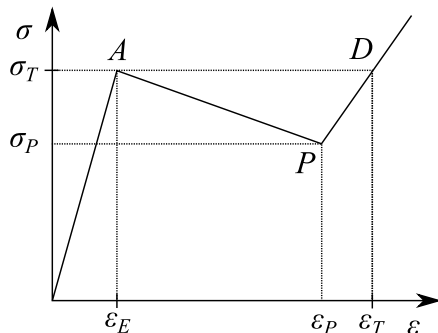


Рис. 1. Кусково-лінійна діаграма σ - ϵ одноосового розтягування матеріалу

Таблиця

Параметри кусочно-лінійної діаграми матеріалу

Параметр	Значення
Межа пружності ϵ_E	0,2 %
Межа текучості ϵ_T	2,2 %
Напруження початку плинності σ_T	100 МПа
Напруження закінчення розм'якшення σ_P	80 МПа
Деформація ϵ_P	2,0 %

На основі експериментальних даних [12] було побудовано кусково-лінійну діаграму σ - ϵ , яка представлена на рисунку 1 а її параметри – в таблиці. Механічна поведінка матеріалу пластини задається діаграмою з низхідною ділянкою, що слідує безпосередньо за ділянкою пружного

деформування. Для чисельного моделювання поведінки зразків, вироблених із матеріалів із майданчиком плинності було використано скінчено-елементний пакет SIMULIA Abaqus Learning Edition. Однією з переваг цього програмного пакету є здатність задавати поведінку нестандартних матеріалів, зокрема було використано матеріал з кусково-лінійною діаграмою напружень-деформацій, а також можливість задати низхідні ділянки на цій діаграмі, що відповідає процесу деформаційного розм'якшення. Ще однією особливістю чисельного моделювання процесу локалізації є необхідність врахування неоднорідності напружено-деформованого стану моделі. Для цього в розрахункову сітку скінчених елементів моделі було додано спеціальний елемент зі зниженою межею плинності, порівняно з рештою вузлів.

Задача про пластичну деформацію в балці під дією згинального моменту. Розглянуто чистий згин полоси (поздовжнього перерізу, що містить вісь балки, симетричної по ширині) постійної висоти h та довжини L під дією згинального моменту M (рис. 2). Напружено-деформований стан в полосі залишається однорідним до тих пір, доки величина напружень в крайніх волокнах ($A-A$, $A'-A'$, рис. 2) не досягне значення верхньої межі плинності $\sigma_T = 100$ МПа [13].

Дослідження процесу деформації проводилося з використанням скінчено-елементної моделі (рис. 3). З огляду на симетрію в моделі враховано тільки половину полоси. На осі симетрії полоси введено початкову недосконалість P у вигляді скінченого елемента з межею плинності σ_T^* , що становить 80 % від межі плинності всього іншого матеріалу. Таким чином, процес деформації полоси після досягнення межі плинності стає неоднорідним [13].

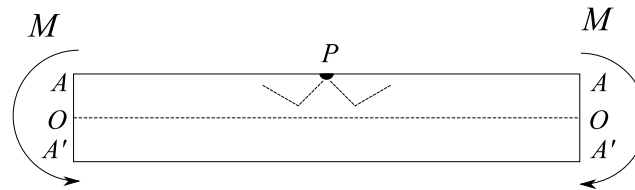


Рис. 2. Чистий згин полоси під дією згинальних моментів

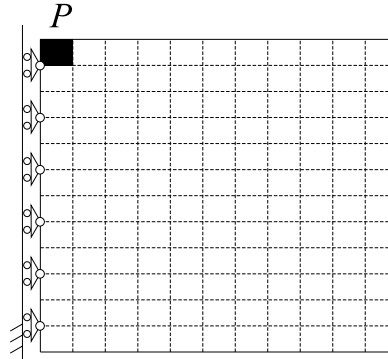


Рис. 3. Скінчено-елементна модель полоси

Результати моделювання процесу пластичної локалізації при збільшенні згинального моменту M представлені на рисунку 4, де зображено область в околиці вузла початкової недосконалості P . На кожному рисунку представлено область розмірами $6,88 \times 5$ см, у якій нижня границя співпадає з нейтральною лінією ($O-O$ на рис. 2), верхня границя області співпадає з верхньою границею полоси ($A-A$ на рис. 2), а ліва границя – з вертикальною віссю симетрії полоси. Таким чином, вузол з початковою недосконалістю розташований у верхньому лівому куті. Темнішим відтінком позначається область локалізації, а саме вузли, в яких після досягнення напруженнями значення σ_T починається процес розм'якшення та зниження напружень до σ_p згідно з низхідною ділянкою $A-P$ на діаграмі напружень-деформацій (рис. 1).

Коли напруження навколо початкової недосконалості P досягають значення σ_T^* виникає область локалізації (верхній лівий кут на рисунку 4, а) [14]. При збільшенні згинального моменту область локалізації розширюється у вигляді полоси локалізації (рис. 4, б, в), головна вісь якої відхилена по відношенню до вертикалі на кут, близький до 35° [4]. Область локалізації продовжує розширюватися від верхньої границі вглиб матеріалу у напрямку нейтральної лінії

(рис. 4, г, д). Проте лінія локалізації не може досягти нейтральної лінії через зниження напружень при віддаленні від верхньої границі полоси. При подальшому збільшенні згинального моменту область локалізації розвивається у зворотному напрямку від нейтральної лінії до поверхні (рис. 4, е). На рисунку 4, е зображено стан області локалізації, коли величини згинального моменту M достатньо, щоб всі елементи на верхній границі полоси досягли напружень σ_T , і стан пластичності став однорідним. Таким чином, стан пластичного шарніра на рисунку 4, е, викликаний початковою недосконалістю, при чистому згині в полосі досягається тоді, коли закінчено процес утворення смуги пластичної локалізації.

Задача про пластичну деформацію у трубі під дією внутрішнього тиску. Розглянуто деформацію труби діаметру D з товщиною стінки d під дією внутрішнього тиску q (рис. 5). Механічна поведінка матеріалу труби задається діаграмою на рис. 1 з низхідною ділянкою, що слідує безпосередньо за ділянкою пружного деформування, а параметри діаграми зазначені в таблиці. Напружено-деформований стан в поперечному перерізі залишається однорідним до тих пір, доки величина напружень не досягне значення верхньої межі плинності $\sigma_T = 100$ МПа [12].

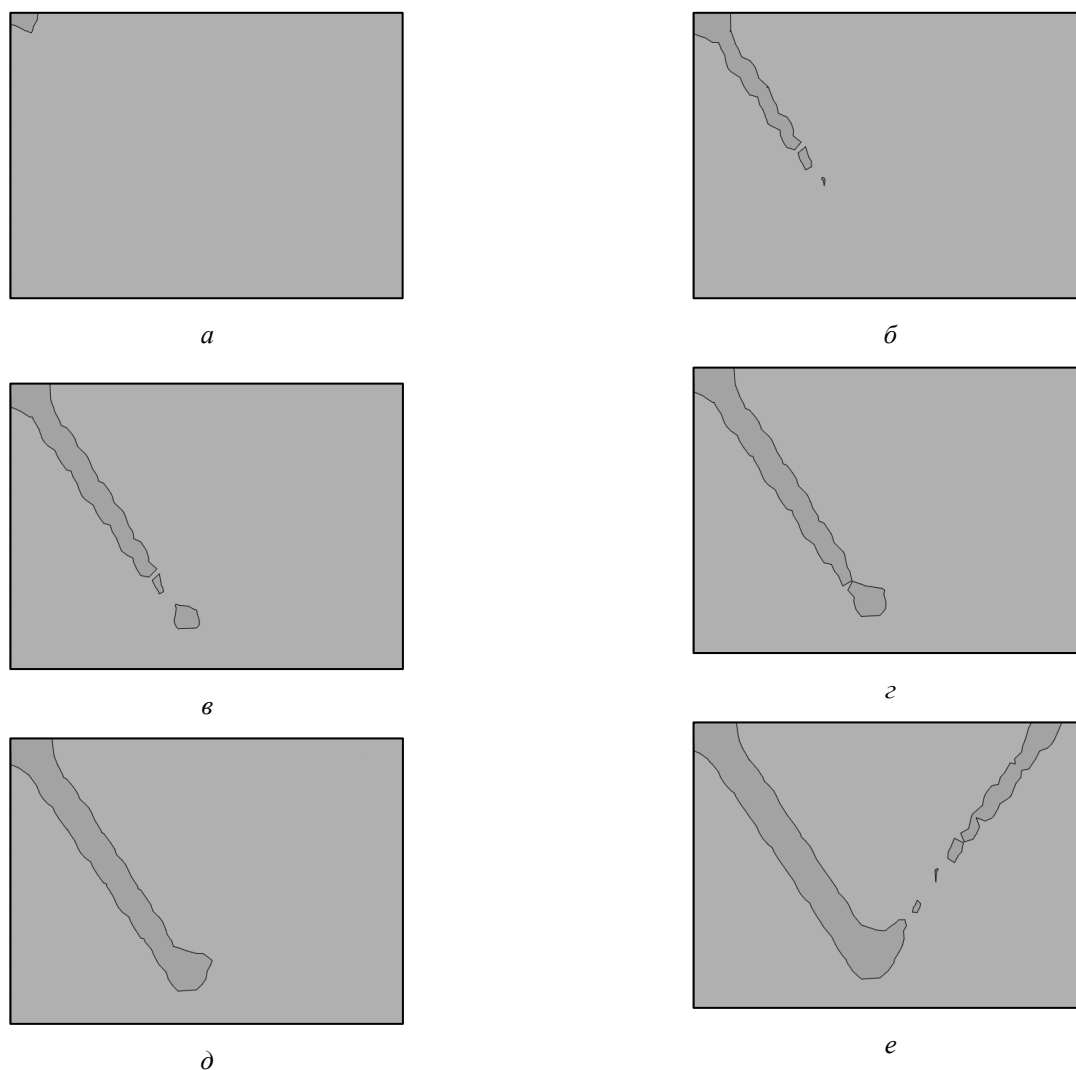


Рис. 4. Результати чисельного моделювання розвитку області локалізації в околі початкової недосконалості при чистому згині полоси: а – момент, коли напруження в елементах верхньої вільної поверхні досягають σ_T^* (80 % від σ_T , межа для елемента початкової недосконалості); б–е – моменти, коли напруження досягають відповідно 84 %, 88 %, 92 %, 96 % та 100 % від σ_T

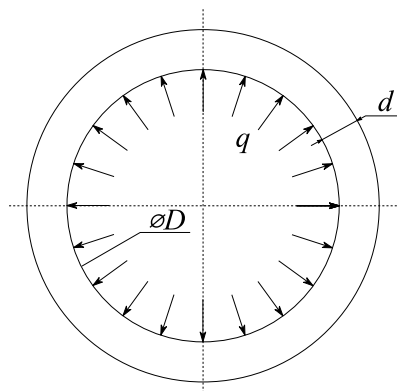


Рис. 5. Постановка задачі про пластичну деформацію труби під дією внутрішнього тиску q

Для дослідження процесу деформації використовується скінчено-елементна модель (рис. 6). З огляду на симетрію в

моделі розглядається тільки радіальний сектор труби. На внутрішній поверхні труби введена початкова недоскоальність P у

вигляді скінченного елемента з межею плинності σ_T^* , що становить 80 % межі плинності іншого матеріалу. Таким чином,

розподіл деформацій після досягнення межі плинності стає неоднорідним, що необхідно для утворення пластичної локалізації [13].

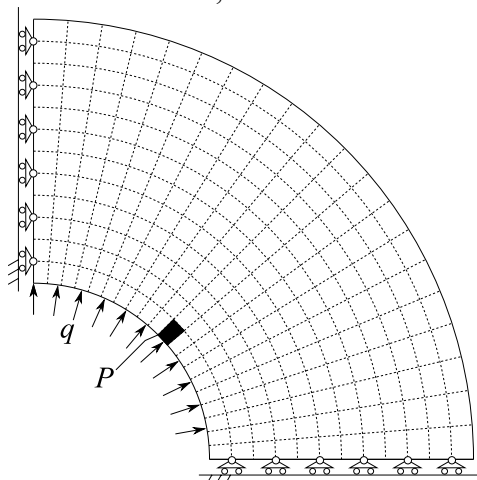


Рис. 6. Скінчено-елементна модель частини труби під дією внутрішнього тиску

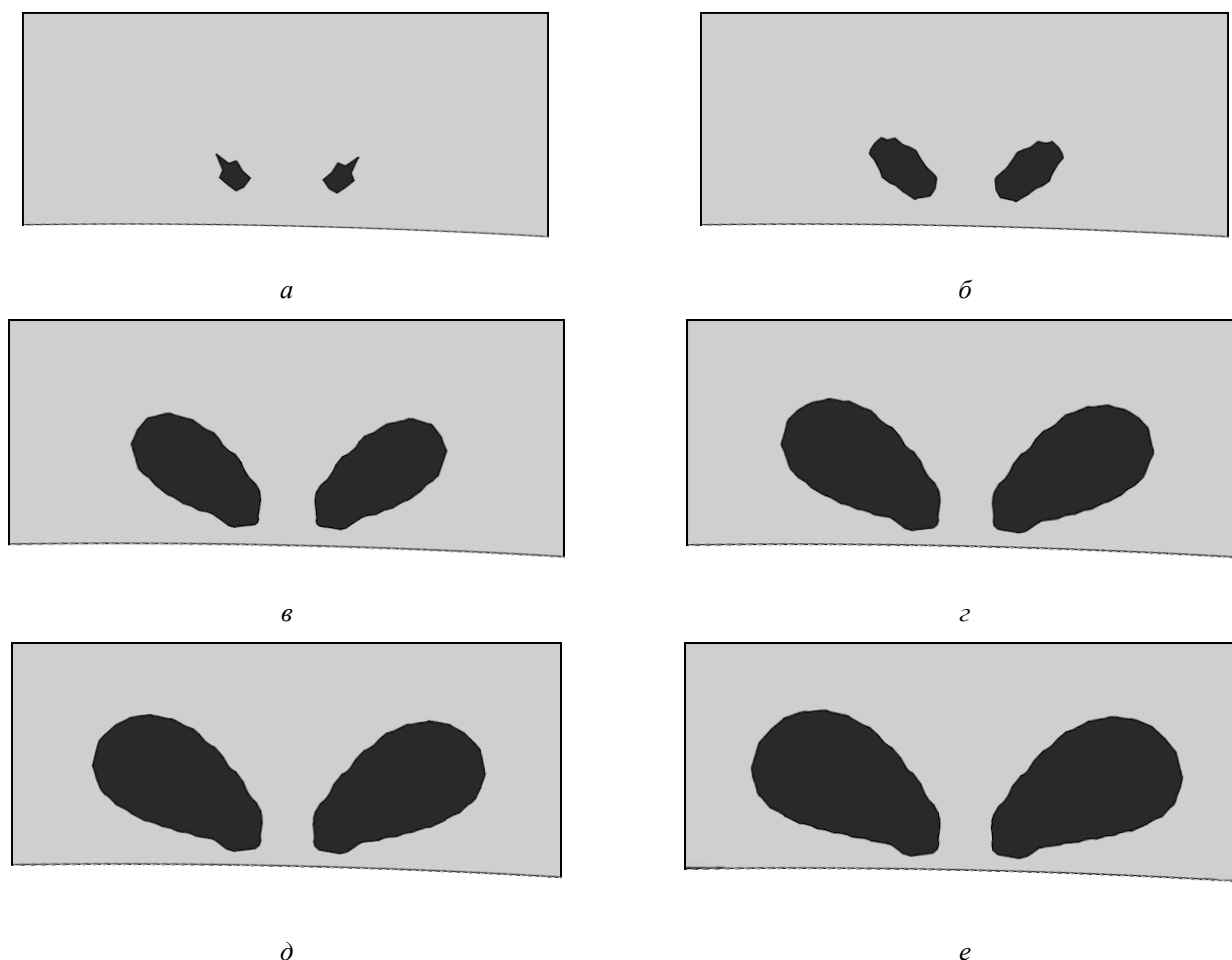


Рис. 7. Результати чисельного моделювання розвитку області пластичної локалізації в трубі в околі початкової недосконалості P при збільшенні внутрішнього тиску q : а – момент, коли радіальні напруження в елементах внутрішньої поверхні досягають σ_T^* (80 % від σ_T , межа для елемента початкової недосконалості); б–е – моменти коли напруження досягають відповідно 84 %, 88 %, 92 %, 96 % та 100 % від σ_T

Результати досліджень процесу локалізації в околі початкової недосконалості P при різних значеннях внутрішнього тиску Q представлені на рисунку 7. На кожному рисунку зображено область розмірами $5,5 \times 2,75$ см в околиці елемента початкової недосконалості P . Нижній край являє собою внутрішню поверхню труби, яка знаходиться під дією тиску. Темним кольором позначається область локалізації, а саме вузли скінчено-елементної моделі, де після досягнення напруженнями значення σ_T починається процес розм'якшення, та напруження знижуються до величини σ_P .

При досягненні напруженнями в околиці початкової недосконалості P значення σ_T^* виникають дві області локалізації, радіально симетричні відносно радіусу труби, що проходить через точку P (рис. 7, а) [14]. На відміну від випадку чистого згину полоси (рис. 4) області локалізації не охоплюють елементи на внутрішній поверхні труби через особливості моделювання задачі, зокрема через те, що на внутрішній поверхні задана гранична умова. При збільшенні внутрішнього тиску області локалізації розширюються (рис. 7, б–е), але на відміну від попереднього випадку, область локалізації розвивається не вздовж прямої

лінії, а вздовж дуги [1]. На рисунку 7, е зображено стан області локалізації, коли величини внутрішнього тиску q достатньо, щоб всі елементи на внутрішній границі труби досягли напружень σ_T , і стан пластичності став однорідним.

Висновок

На основі теорії пластичної поведінки матеріалу з майданчиком плинності було проведено чисельне моделювання пластичної деформації тіл та оцінено момент досягнення межі пластичності. Було розглянуто особливості розвитку лінії ковзання в окремих випадках. Ці результати збігаються з відомими результатами експериментів із дослідження лінії ковзання в розглянутому класі матеріалів.

Таким чином, за допомогою чисельних експериментів можна проводити оцінку меж цілісності та стійкості елементів конструкцій, виготовлених з матеріалів, що мають майданчик плинності. Відмінності матеріалів із майданчиком плинності від звичайних конструкційних матеріалів дають змогу застосовувати їх в нетипових випадках. Тому потрібні більш детальні дослідження в рамках будівельної механіки для більш глибокого розуміння механічних процесів, теоретичного осмислення та моделювання, що засноване на точних математичних моделях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Liu Y., Kyriakides S. Effect of geometric and material discontinuities on the reeling of pipelines. *Applied Ocean Research*. 2017. № 65. Pp. 238–250.
2. Liu Y., Kyriakides S., Hallai J. F. Reeling of pipe with Lüders bands. *International Journal of Solids and Structures*. 2015. № 72. Pp. 11–25.
3. Hallai J. F., Kyriakides S. Underlying material response for Lüders-like instabilities. *International Journal of Plasticity*. 2013. Vol. 47. Pp. 1–12.
4. Corona E., Shaw J. A., Iadicola M. A. Buckling of steel bars with Lüders bands. *International Journal of Solids and Structures*. 2002. № 13–14 (39). Pp. 3313–3336.
5. Yoshida F., Uemori T., Fujiwara K. Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain. *International Journal of Plasticity*. 2002. № 5 (18). Pp. 633–659.
6. Bažant Z. P., Belytschko T. B. Wave Propagation in a Strain-Softening Bar: Exact Solution. *Journal of Engineering Mechanics*. 1985. № 3 (111). Pp. 381–389.
7. Kyriakides S. Buckle propagation in pipe-in-pipe systems : Part I. Experiments. *International Journal of Solids and Structures*. 2002. № 2 (39). Pp. 351–366.
8. Corona E., Shaw J. A., Iadicola M. A. Buckling of steel bars with Lüders bands. *International Journal of Solids and Structures*. 2002. № 13–14 (39). Pp. 3313–3336.
9. Broberg K. B. Cracks and fracture. Elsevier, 1999.

10. Лабібов Р. Р. Розвиток полоси локалізації на майданчику плинності. Математичні проблеми технічної механіки та прикладної математики-2019 : Міжнар. наук. конф. 1(5–18 квітня 2019 р., м. Кам'янське). 2019. С. 55.
11. Лабібов Р. Р., Черняков Ю. А. Лінії локалізації при чистому згині пластини в її площині. Сучасні проблеми механіки та математики : Міжнар. наук. конф. (22–25 травня 2018 р., м. Львів). 2018. Т. 1. С. 106–108.
12. Kyriakides S. & Miller J. E. On the Propagation of Lüders Bands in Steel Strips. *Journal of Applied Mechanics*. 2000. № 4 (67). Pp. 645–654.
13. Bažant Z. P. & Belytschko T. B. Wave Propagation in a Strain-Softening Bar: Exact Solution. *Journal of Engineering Mechanics*. 1985. № 3 (111). Pp. 381–389.
14. Shaw J. A. & Kyriakides S. Initiation and propagation of localized deformation in elasto-plastic strips under uniaxial tension. *International Journal of Plasticity*. 1997. № 10 (13). Pp. 837–871.

REFERENCES

1. Liu Y. and Kyriakides S. Effect of geometric and material discontinuities on the reeling of pipelines. *Applied Ocean Research*. 2017, no. 65, pp. 238–250.
2. Liu Y., Kyriakides S. and Hallai J.F. Reeling of pipe with Lüders bands. *International Journal of Solids and Structures*. 2015, no. 72, pp. 11–25.
3. Hallai J.F. and Kyriakides S. Underlying material response for Lüders-like instabilities. *International Journal of Plasticity*. 2013, vol. 47, pp. 1–12.
4. Corona E., Shaw J.A. and Iadicola M.A. Buckling of steel bars with Lüders bands. *International Journal of Solids and Structures*. 2002, no. 13–14 (39), pp. 3313–3336.
5. Yoshida F., Uemori T. and Fujiwara K. Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain. *International Journal of Plasticity*. 2002, no. 5 (18), pp. 633–659.
6. Bažant Z.P. and Belytschko T.B. Wave Propagation in a Strain-Softening Bar : Exact Solution. *Journal of Engineering Mechanics*. 1985, no. 3 (111), pp. 381–389.
7. Kyriakides S. Buckle propagation in pipe-in-pipe systems : Part I. Experiments. *International Journal of Solids and Structures*. 2002, no. 2 (39), pp. 351–366.
8. Corona E., Shaw J.A. and Iadicola M.A. Buckling of steel bars with Lüders bands. *International Journal of Solids and Structures*. 2002, no. 13–14 (39), pp. 3313–3336.
9. Broberg K.B. *Cracks and fracture*. Elsevier, 1999.
10. Labibov R.R. *Rozvytok polosy lokalizatsii na maidanchiku plinnosti* [Development of plastic localization bands during yielding]. *Rozvytok polosy lokalizatsiyi na maydanchyku plynnosti. Matematychni problemy tekhnichnoyi mekhaniky ta prykladnoyi matematyky-2019 : Mizhnar. nauk. konf.* [Mathematical Problems of Technical Mechanics and Applied Mathematics-2019 : International Science Conference]. April 15–18, 2019, Kamianske, 2019, pp. 55. (in Ukrainian).
11. Labibov R.R. and Chernyakov Yu.A. *Linii lokalizatsii pri chistomu zgini plastyny v ii ploschini* [Plastic localization bands during pure bending of a plate in its plane]. *Suchasni problemy mekhaniky ta matematyky : Mizhnar. nauk. konf.* [Modern Problems of Mechanics and Mathematics : International Science Conference]. May 22–25, 2018, Lviv, 2018, vol. 1, pp. 106–108. (in Ukrainian).
12. Kyriakides S. and Miller J.E. On the Propagation of Lüders Bands in Steel Strips. *Journal of Applied Mechanics*. 2000, no. 4 (67), pp. 645–654.
13. Bažant Z.P. and Belytschko T.B. Wave Propagation in a Strain-Softening Bar: Exact Solution. *Journal of Engineering Mechanics*. 1985, no. 3 (111), pp. 381–389.
14. Shaw J.A. and Kyriakides S. Initiation and propagation of localized deformation in elasto-plastic strips under uniaxial tension. *International Journal of Plasticity*. 1997, no. 10 (13), pp. 837–871.

Надійшла до редакції: 21.03.2025.

УДК 332.62/.64

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.75.1146

МЕХАНІЗМИ ОБЧИСЛЕННЯ КОМПЕНСАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ РИНКОВОЇ ВАРТОСТІ НЕРУХОМОГО МАЙНА

ЛАНДО Є. О.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
МУРАХТАНОВА А. Л.², провідний оцінювач,
НЕТЯГА К. В.³, аспірант

^{1*} Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: lando.evgen@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2608-931X

² ТОВ «Експерт+», вул. Полігонна, 25-а, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: murahtanova@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-5642-7158

³ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: netiaga.kostiantyn@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-1837-5882

Анотація. Війна в Україні залишила після себе руйнівні наслідки, серед яких – тисячі пошкоджених та зруйнованих будівель. Одним з найбільш гострих питань, що постають сьогодні, є визначення обсягу компенсацій для власників постраждалого майна. **Мета роботи** – на прикладі об'єкта, що постраждав унаслідок збройної агресії Російської Федерації в м. Дніпро, провести вартісний аналіз та визначити компенсацію за знищений об'єкт нерухомого майна. **Практична значимість.** Апробовано процедуру визначення ринкової вартості та компенсації за знищений об'єкт нерухомого майна. **Результати.** Розроблено та апробовано алгоритм визначення ринкової вартості та компенсації за знищені об'єкти нерухомого майна. Результати розрахунків дозволять мешканцям об'єкта отримати сертифікати на компенсацію зруйнованого майна.

Ключові слова: ринкова вартість; оціночна вартість, знищені об'єкти нерухомого майна, компенсація за знищений об'єкт.

MECHANISMS FOR CALCULATING COMPENSATION TAKING INTO ACCOUNT THE MARKET VALUE OF REAL ESTATE

LANDO Yev.O.^{1*}, PhD, Assoc. Prof.,
MURAKHTANOVA A.L.², Leading Appraiser
NETIAHA K.V.³, PhD-Stud.

^{1*} Department of Highways, Geodesy and Land 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, e-mail: lando.evgen@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2608-931X

² LLC “Expert+”, 25-a, Polygonna St., Dnipro, 49000, Ukraine, e-mail: murahtanova@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-5642-7158

³ Department of Highways, Geodesy and Land 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, e-mail: netiaga.kostiantyn@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-1837-5882

Abstract. The war in Ukraine has left devastating consequences, including thousands of damaged and destroyed buildings. One of the most pressing issues today is determining the amount of compensation for the owners of affected property. As a result of the military aggression of the Russian Federation in Ukraine, many buildings and structures have suffered damage and destruction. According to the Law of Ukraine, destroyed real estate objects are those located in Ukraine that have become unsuitable for their intended use due to hostilities, terrorist acts, or sabotage caused by the armed aggression of the Russian Federation against Ukraine. These objects cannot be restored through current or major repairs, reconstruction, or restoration, or their res. **Scientific novelty.** Using the example of an object affected by the armed aggression of the Russian Federation in the city of Dnipro, conduct a cost analysis and determine compensation for the destroyed real estate object. **Practical significance.** The procedure for determining the market value and compensation for a destroyed real estate object has been tested. According to the calculations, the market value of apartments falls within the range of the appraised value determined using the Unified Database of Appraisal Reports,

taking into account the permissible 25 % range. **Results.** An algorithm for determining the market value and compensation for destroyed real estate objects has been developed and tested. The calculation results will enable residents of the affected property to receive certificates for compensation for the destroyed assets. It should be noted that the calculations were performed under current wartime conditions, where housing market prices in the city of Dnipro are experiencing negative dynamics, while costs for construction materials and work are rising due to inflation and a labor shortage. For instance, after the end of hostilities, this imbalance in indicators might level out, making restoration feasible. However, under the current conditions of economic uncertainty, it is impossible to predict when exactly this might occur. Nevertheless, theoretically, such an outcome is possible.

Keywords: market value; appraised value; destroyed real estate objects; Compensation for destroyed property

Постановка проблеми. Унаслідок військової агресії російської федерації в Україні багато будівель та споруд зазнали пошкоджень та руйнувань. Відповідно до Закону України [1] **знищені об'єкти нерухомого майна** – об'єкти нерухомого майна, які розташовані в Україні та стали непридатними для використання за цільовим призначенням внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій, спричинених збройною агресією Російської Федерації проти України, відновлення яких є неможливим шляхом поточного або капітального ремонту, реконструкції, реставрації чи економічно недоцільним.

Мета дослідження – на прикладі об'єкта постраждалого унаслідок збройної агресії російської федерації у м. Дніпро визначити різні види вартості та компенсації за знищений об'єкт нерухомого майна.

Виклад основного матеріалу і отриманих наукових результатів.

Об'єктом аналізу стали житлові квартири, що розташовані в пошкодженному внаслідок збройної агресії російської федерації житловому будинку міста Дніпро. Квартири розташовані в 10-ти поверховому житловому будинку, який згідно [2], знаходиться в аварійному технічному стані. Категорія пошкоджень III – квартири непридатні для використання за цільовим призначенням, наявні пошкодження несучих та огорожувальних конструкцій, ступінь та характер яких свідчить про небезпеку аварійного обвалення будівельних конструкцій, рекомендується виконання невідкладних робіт щодо демонтажу (ліквідації) об'єкту.

Визначення можливого розміру компенсації за знищений об'єкт нерухомого майна здійснюється наступним чином:

- виконання аналізу вартості житлової нерухомості на вторинному та первинному ринках;

- визначення ринкової (вартість, за яку можливе відчуження об'єкта оцінки на ринку подібного майна на дату оцінки за угодою, укладеною між покупцем та продавцем, після проведення відповідного маркетингу за умови, що кожна із сторін діяла із знанням справи, розсудливо і без примусу)/оціночної (оціночна вартість – вартість, яка визначається за встановленими алгоритмом та складом вихідних даних) вартості об'єкта нерухомості;

- визначення розміру компенсації за знищений об'єкт нерухомого майна;

- виконання узгодження отриманих результатів.

Аналіз вартості житлової нерухомості.

Дослідження ринку житлової нерухомості виконані на підставі інформації АН «Олімп консалтинг» <https://olimp.net.ua/interactivnaya-karta-dnepropetrovskoy-oblasti/gorod-dnepr> та відповідно до аналітичних матеріалів СП «УВЕКОН» (https://uvecon.ua:8080/account/int_report/int_report_2023_2024_koatuu/), середня вартість пропозиції на вторинному ринку житлової нерухомості для всі класів складає 863 \$/м², середній розмір торгу складає 10 %, для мікрорайону Володарського, Шевченківського району середня вартість пропозиції на вторинному ринку житлової нерухомості для всі класів складає 1019 \$/ м².

Таблиця 1

Ринок житлової нерухомості економ, комфорт, бізнес клас, Дніпро, липень 2024 рік

Період дослідження червень–липень 2024 рік			
Дніпро економ, комфорт, бізнес клас	Липень Середня вартість м² 811 \$		Зниження у відсотках 0,61 %
Адміністративні райони	Липень Середня вартість \$ м² житл. нерухомість	Зниження у доларах \$% червень – липень 2024 р.	Зниження у відсотках % червень – липень 2024 р.
Амур- Нижньодніпровськи	757	–5,0	–0,66
Шевченківський	820	–5,0	–0,61
Соборний	906	–5,0	–0,55
Індустріальний	771	–5,0	–0,64
Центральний	944	–5,0	–0,53
Чечеловський	807	–5,0	–0,74
Новокодацький	766	–5,0	–0,65
Самарський	719	–5,0	–0,69

Таблиця 2

Первинний ринок житлової нерухомості комфорт, бізнес клас, Дніпро, липень 2024 рік

Період дослідження червень–липень 2024 рік			
Дніпро первинний ринок комфорт, бізнес клас	Липень середня вартість м² 1 196 \$		Зниження у відсотках – 0,42 %
Адміністративні райони	Липень Середня вартість \$ м² житл. нерухомість	Зниження у доларах \$ % червень – липень 2024 р.	Зниження у відсотках % червень – липень 2024 р.
Амур- Нижньодніпровськи	1143	–5,0	–0,44
Шевченківський	1190	–5,7	–0,47
Соборний	1434	–5,0	–0,35
Індустріальний	978	–5,3	–0,54
Центральний	1478	–6,0	–0,40
Чечеловський	1217	–5,7	–0,46
Новокодацький	1089	–5,0	–0,46
Самарський	1039	–4,7	–0,45



Рис. 1. Аналітичні матеріали СП «УБЕКОН»

На підставі даних аналізу ринку житлової нерухомості зроблено висновок щодо вартості житлової нерухомості об'єкту обстеження:

– вартість житлової нерухомості на вторинному ринку комфорт, бізнес клас у м. Дніпро, Шевченківський район складає 820–1 019 \$/м²;

– вартість житлової нерухомості на первинному ринку комфорт, бізнес клас у м. Дніпро, Шевченківський район складає 1 190 \$/м².

Отже орієнтовна вартість на підставі аналізу ринку двокімнатної квартири № 55, загальною площею 76,2 м², площа житлових приміщень 36,6 м², розташованої на 8-му поверсі, 10-ти поверхового будинку, 2004 р. введення в експлуатацію, розташованому у м. Дніпро, вул. Виконкомівська 24А складала б: для об'єкта вторинного ринку 62 484 \$ (2 562 894 грн, 33 634 грн/м²); для об'єкта первинного ринку 90 678 \$ (3 719 321 грн, 48 810 грн/м²); для об'єкта вторинного ринку у визначеному мікрорайоні розташування квартири 77 648 \$, (3 184 864 грн, 41 796 грн/м²).

Визначення оціночної вартості об'єкта нерухомості.

Для цілей обчислення доходу платника податку – фізичної особи від продажу (обміну) нерухомого майна, а також доходу, отриманого платником податку в результаті прийняття ним у спадщину чи дарунок майна (крім випадків успадкування та/або отримання у дарунок майна, вартість якого обчислюється за нульовою ставкою), доходу, отриманого за іншими правочинами, за якими здійснюється перехід права власності на нерухомість, дохід за якими підлягає оподаткуванню у випадках, передбачених Податковим кодексом України необхідно визначити оціночну вартість об'єкта нерухомості або ринкову вартість об'єкта нерухомості.

Для визначення оціночної вартості об'єкта нерухомості Єдиною базою даних звітів про оцінку (<https://evaluation.sprfu.gov.ua>) формується електронна довідка про його оціночну вартість (е-Довідка), яка є

чинною впродовж 30 календарних днів з дня її формування Єдиною базою [3].

За даними технічного паспорту наданого власником отримана довідка про оціночну вартість об'єкта нерухомого майна.

Оціночна вартість двокімнатної квартири № 55, загальною площею 76,2 м², площа житлових приміщень 36,6 м², розташованої на 8-му поверсі, 10-ти поверхового будинку, 2004 р. введення в експлуатацію, розташованому у м. Дніпро, вул. Виконкомівська, 24-а складає 3 526 167 грн (46 275 грн/м²).

Електронна довідка про оціночну вартість об'єкта нерухомості – документ, сформований на запит фізичної або юридичної особи на підставі даних про об'єкт нерухомості, внесених до Єдиної бази даних звітів про оцінку за допомогою мережі Інтернет, та містить оціночну вартість такого об'єкта, розраховану модулем електронного визначення оціночної вартості.

Реєстрація звітів в Єдиній базі здійснюється на підставі відповідності ринкової вартості об'єкта оцінки допустимому 25-відсотковому діапазону вартості на співставні об'єкти нерухомості, інформація про які міститься в Єдиній базі, визначеного Модулем.

Інформаційна основа для визначення Модулем оціночної вартості об'єкта нерухомості формується шляхом використання:

інформаційних джерел з відкритим доступом, зокрема даних Інтернет ресурсів, які системно публікують об'яви (оголошення), щодо пропозицій з продажу нерухомого майна;

даних про ціни, зазначені в договорах купівлі-продажу об'єктів нерухомості, внесених нотаріусами до Єдиної бази;

даних про ринкову вартість об'єктів нерухомості, внесених до Єдиної бази на підставі звітів про оцінку.

Оціночна вартість відповідно до Довідки [3] знаходиться в діапазоні 2 644 625–4 407 709 грн.

16 вересня 2024 року (дата формування довідки)	Додаток 2 до Порядку ведення єдиної бази даних звітів про оцінку (пункт 5 розділу II) 201-20240916-0008417440 (унікальний реєстраційний номер)
---	---

**Довідка
про оціночну вартість об'єкта нерухомості**

1. Заявник (прізвище, власне ім'я та по батькові (за наявності) або найменування юридичної особи)

ЛАНДО ЄВГЕН ОЛЕКСАНДРОВИЧ

2	7	5	2	5	0	8	8	5	8
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

(Код ЄДРПОУ реєстраційний номер облікової картки платника податків або серія та номер паспорта (для фізичних осіб, які через свої релігійні переконання відмовилися від прийняття реєстраційного номера облікової картки платника податків та офіційно повідомили про це відповідний контролюючий орган і мають відмітку у паспорті))

2. Вид об'єкта оцінки(1)

житлова нерухомість

3. Тип об'єкта оцінки(2)

квартира в багатопверховій житловій будівлі

4. Назва об'єкта

Квартира №55 в житловому будинку №24а (УКМОЧ4687840)

5. Поштова адреса

ДНІПРОПЕТРОВСЬКА ОБЛАСТЬ, ДНІПРО, вул. Віконіомівська, буд. 24А, кв. 55

6. Загальна площа, кв. м

76.20

7. Площа житлових приміщень(3), кв. м

36.60

8. Рік завершення(4)

забудова з 2001 по 2010

9. Рік введення в експлуатацію будинку/будівлі

2004

10. Поверховість будинку/будівлі

10

11. Поверх у будинку/будівлі(5)

8

12. Кількість кімнат у квартирі(6)

2

13. Розмір частки, що оцінюється(7), кв. м

76.20

14. Кадастровий номер земельної ділянки(8)

15. Площа земельної ділянки(9), кв. м

16. Категорія(10)	
17. Цільове призначення(10)	
18. Функціональне призначення(11)	
19. Коефіцієнт готовності об'єкта(12), %	
20. Оціночна вартість об'єкта оцінки, грн	3526166.58
20.1 Оціночна вартість поліпшень(13), грн.	3526166.58
20.2 Оціночна вартість земельної ділянки(13), грн.	

Примітки

1) Внески пояснюють яку саме інформацію, що відноситься до об'єкта оцінки, слід зазначити (визначити, вказати).

1. Житлова нерухомість, земельна ділянка, нежитлова нерухомість, об'єкт незавершеного будівництва.

2. Для житлової нерухомості:

- квартири в багатопверховій житловій будівлі;
- квартири в малоповерховій житловій будівлі;
- апартаменти;
- гуртожиток;
- комуніальні квартири;
- житлові приміщення;
- житловий будинок;
- котедж (будинок одноквартирний підвищеної комфортності);
- таунхаус;
- дачний (садовий) будинок.

Для нежитлової нерухомості:

- адміністративна будівля або приміщення;
- промислова (складська) будівля або приміщення;
- торговельна будівля або приміщення;
- гараж;
- паркувальне місце в закритому паркінгу.

3. Зазначається для об'єктів житлової нерухомості, крім гуртожитку, комуніальної квартири та дачного (садового) будинку.

4. Зазначається для об'єктів житлової нерухомості, крім житлового будинку, котеджу (будинку одноквартирний підвищеної комфортності), таунхаусу, дачного (садового) будинку:

- дореволюційна забудова до 1920;
- забудова з 1921 по 1955;
- забудова з 1956 по 1970;
- забудова з 1971 по 1979;
- забудова з 1980 по 1990;
- забудова з 1991 по 2000;
- забудова з 2001 по 2010;
- забудова з 2011.

5. Зазначається для:

- квартири в багатопверховій житловій будівлі;
- квартири в малоповерховій житловій будівлі;
- апартаменти;
- гуртожитку / комуніальній квартирі;
- житлового приміщення;
- адміністративної будівлі або приміщення;
- промислової (складської) будівлі або приміщення;
- торговельної будівлі або приміщення.

6. Зазначається для житлової нерухомості крім дачного (садового) будинку.

7. Зазначається у разі оцінки частки об'єкта.

8. Зазначається для:

- житлового будинку;
- котеджу (будинку одноквартирний підвищеної комфортності);
- таунхаусу;
- земельної ділянки;
- об'єкта незавершеного будівництва.

9. Зазначається для:

- житлового будинку;
- котеджу (будинку одноквартирний підвищеної комфортності);
- таунхаусу;
- дачного (садового) будинку.

Визначення ринкової вартості об'єкта нерухомості.

Визначення ринкової вартості об'єкта виконане порівняльним підходом на підставі даних про ринкові ціни продажу нерухомості, які визначалися за даними пропонування до продажу на відповідному сегменті ринку пропонування до продажу комерційної нерухомості в м. Дніпро. При виборі об'єктів порівняння особлива увага приділялася конструктивно-технічними характеристикам, які відповідають об'єкту оцінки, розташуванню і споживчим якостям. Ціни для об'єктів порівняння прийняті за даними інтернет ресурсів та маркетплейсів www.olx.ua, www.dom.ria.ua.

Згідно п. 3 Національного стандарту оцінки №1 аналоги обрані для розрахунків, квартири у житлових багатопверхових будинках, розташованих в Шевченківському районі м. Дніпро та відповідають визначенню подібне майно – майно, що за своїми характеристиками та (або) властивостями подібне до об'єкта оцінки з урахуванням відмінностей об'єкта оцінки і має таку саму інвестиційну привабливість.

Відмінності об'єкта оцінки та об'єктів порівняння визначалися кількісно за допомогою коефіцієнта відмінності К_{ві}, введення якого дозволяє ідентифікувати відмінності і властивості, які важливі для даного ринку.

Величина коефіцієнта відмінності і-го фактора визначається за формулою:

$$K_{vi} = \left(\frac{X_o - X_a}{X_a + X_o} \right) / 10 \cdot 100\%,$$

де X_a – кількісний або бальний показник об'єкта порівняння; X_o – відповідний показник об'єкта оцінки.

Скоригована ціна об'єкта порівняння визначається за формулою: $Z = K_{vi} \times C_a$, де K_{ві} – коефіцієнт коригування; C_a – ринкова ціна об'єкта порівняння.

Визначена ринкова вартість 1 м² (як ціна, яку можна отримати на дату оцінки при продажу завершеного розвитком (будівництвом) об'єкта нерухомого майна на ринку) становить 46 699 грн.

Для визначення ринкової вартості житлової нерухомості порівняльним підходом виконане коригування цін

пропонування нерухомості до продажу на відмінності з об'єктом оцінки. Першими застосовані поправки, пов'язані з торгом, правами, часом продажу, потім водяться інші поправки. Перші три коригування вносяться послідовно. Кожне наступне

коригування вноситься до попередньої відкоригованої ціни пропонування. Решта коригувань вноситься на незалежній основі шляхом додавання і віднімання відсотків і коригуванням на сумарний відсоток.

№	Показник	Об'єкт оцінки	Об'єкт порівняння №1	Об'єкт порівняння №2	Об'єкт порівняння №3	Об'єкт порівняння №4
1	Джерело посилає:		https://dom.ua.com/uk/realty-prodaz-kvartir-dnipro-shchuchenskoyi-sposkomyskaya	https://reitor.ua/dnipro/flat-sale/11371803/?utm_medium=referral&utm_source=flaty.ua&utm_campaign=dnipro-shchuchenskoyi-sposkomyskaya	https://um.ua.com/uk/obvyazani-skupke-5-komnatnykh-kvartir-ucentre-dnipro-shchuchenskoyi-sposkomyskaya	https://reitor.ua/dnipro/flat-sale/11521677/?utm_campaign=central-rank-108-um_medium
2	Дата актуалізації пропозиції		актуалізований 08.09.2024 р.	актуалізований 09.09.2024 р.	актуалізований 09.09.2024 р.	актуалізований 09.09.2024 р.
3	Адреса (вулиця/орієнтир):	Дніпропетровська область, м. Дніпро, вул. Виконкомівська, 24А	Дніпропетровська область, м. Дніпро, вул. Виконкомівська, 21	Дніпропетровська область, м. Дніпро, вул. Виконкомівська, 21	Дніпропетровська область, м. Дніпро, вул. Виконкомівська, 24Б	Дніпропетровська область, м. Дніпро, вул. Виконкомівська, 7
4	Ціна пропозиції об'єкта, \$:		80 000,0	132 990,0	178 000,0	98 900,0
5	Ціна пропозиції об'єкта за курсом НБУ, грн.:	41,016900	3 281 344,0	5 454 824,0	7 300 990,0	4 056 562,0
6	Наявність додаткових поліпшень (збудованої меблі, побутової техніки, тощо):	уточнює відсутні	відсутня (не входить до ціни пропозиції)	відсутня (не входить до ціни пропозиції)	відсутня (не входить до ціни пропозиції)	відсутня (не входить до ціни пропозиції)
7	Поправка грошова на наявність додаткових поліпшень, грн.:		0,00	0,0	0,0	0,0
8	Ціна пропозиції об'єкта без додаткових поліпшень, грн.:		3 281 344,0	5 454 824,0	7 300 990,0	4 056 562,0
9	Умови продажу:	вільний продаж	вільний продаж	вільний продаж	вільний продаж	вільний продаж
10	Поправка на умови продажу:		1,00	1,00	1,00	1,00
11	Поправка на торг:		0,90	0,90	0,90	0,90
12	Ціна об'єкта з врахуванням поправок на умови продажу і торг, грн.:		2 953 210,0	4 909 342,0	6 570 391,0	3 650 906,0
13	Площа об'єкта, м²:	76,2	49,5	120,9	165,0	105,0
14	Ціна за 1 кв.м, грн.:		59 661,0	40 607,0	39 824,0	34 772,0
15	Поправка на площу:		0,96	1,05	1,08	1,03
16	Характеристика місця розташування:	вул. Виконкомівська	вул. Виконкомівська	вул. Виконкомівська	вул. Виконкомівська	вул. Виконкомівська
17	Поправка на місце розташування:		1,00	1,00	1,00	1,00
18	Тип будівлі:	збудовані приміщення багатоповерхового житлового будинку "новобудова"	збудовані приміщення багатоповерхового житлового будинку "новобудова"	збудовані приміщення багатоповерхового житлового будинку "новобудова"	збудовані приміщення багатоповерхового житлового будинку "новобудова"	збудовані приміщення багатоповерхового житлового будинку "новобудова"
19	Поправка на рівніння у типі будівлі:		1,00	1,00	1,00	1,00
20	Функціональне призначення:	2-кімнатна квартира, об'єкт житлової нерухомості	1-кімнатна квартира, об'єкт житлової нерухомості	3-кімнатна квартира, об'єкт житлової нерухомості	3-кімнатна квартира, об'єкт житлової нерухомості	2-кімнатна квартира, об'єкт житлової нерухомості
21	Поправка на функціональне призначення:		0,95	1,03	1,03	1,03
22	Поправка на поверховість:	8/10	18,20	20,20	3,21	4,9
23	Поправка на поверховість:		1,00	1,05	1,00	1,00
24	Наявність фасадної частини (вікна, вікна):	вікна у двір	вікна у двір	вікна у двір	вікна у двір	вікна у двір
25	Поправка на наявність фасаду:		1,00	1,00	1,00	1,00
26	Технічний стан об'єкта:	добрий, виконано ремонт	добрий, виконано ремонт	під опораження	добрий, виконано ремонт	добрий, виконано ремонт
27	Поправка на технічний стан:		1,00	1,20	1,00	1,00
28	Наявність інженерних комунікацій:	є всі необхідні мережі	є всі необхідні мережі	є всі необхідні мережі	є всі необхідні мережі	є всі необхідні мережі
29	Поправка на наявність інженерних комунікацій:		1,00	1,00	1,00	1,00
30	Скоригована поправка за розрахунком:		0,91	1,36	1,11	1,06
31	Вартість 1 м² з врахуванням поправок п.31, грн.:		54 410,83	55 334,75	44 300,22	36 888,55
Середньозважене значення ряду вартості 1 м², грн.		46 699,0				
Вартість об'єкта оцінки, грн.:		3 558 464,0				
Вартість об'єкта оцінки, \$:		86 756,0				

Рис. 2. Розрахунок ринкової вартості об'єкта нерухомості

Висновки щодо визначених вартостей.

Інтерпретація отриманих результатів наведена у таблиці:

№ з/п	Показник	Вартість, грн
1	Орієнтовна вартість житлової нерухомості згідно до аналізу ринку від до	2 562 894 – 3 719 321
2	Оціночна вартість об'єкта нерухомості від до	2 644 625 – 4 407 709
3	Ринкова вартість об'єкта нерухомості	3 558 464
4	Вартість компенсації за знищений об'єкт нерухомого майна	2 870 721

Подібним чином виконано розрахунок тринадцяти знищених 1-2-3 кімнатних квартир у 10 поверховому житловому будинку у м. Дніпро, вул. Виконкомівська, 24-а.

Орієнтовна вартість житлової нерухомості згідно до аналізу ринку наведена для підтвердження вірності розрахунку ринкової вартості нерухомості. В даному випадку ринкова вартість цілком відповідає діапазону аналізу ринку.

Оціночна вартість об'єкта нерухомості використовується тільки для цілей обчислення доходу платника податку – фізичної особи від продажу (обміну) нерухомого майна, а також доходу, отриманого платником податку в результаті прийняття ним у спадщину чи дарунок майна (крім випадків успадкування та/або отримання у дарунок майна, вартість якого обчислюється за нульовою ставкою), доходу, отриманого за іншими правочинами, за якими здійснюється перехід права власності на нерухомість,

дохід за якими підлягає оподаткуванню у випадках, передбачених Податковим кодексом України. Якщо ж особа не погоджується з результатами автоматичного визначення оціночної вартості об'єкта нерухомості, вона має право звернутися до суб'єкта оціночної діяльності (оцінювача), аби визначити ринкову вартість такого об'єкта.

Слід зауважити, що виконані розрахунки зроблені в поточних умовах війни, коли ціни на ринку житлової

нерухомості міста Дніпро у від'ємній динаміці, а витрати на будівельні матеріали, роботи підвищуються за рахунок інфляції і в умовах дефіциту трудових ресурсів. Тобто, наприклад, після закінчення бойових дій, цей дисбаланс показників може нівелюватися, і тоді відновлення може стати доцільним, тоді як зараз в умовах економічної невизначеності підстав для цього неможливо передбачити – коли саме, але тим не менш, теоретично саме так.

Таблиця 3

Збірна таблиця отриманих результатів визначення різних видів вартості

№ з/п	Показник / квартира №	45	61	63	62	57	37	53	41	42	55	54	38	50
1	Площа	112,5	113,1	78,9	77,4	106,0	112,8	126,2	112,3	75,3	76,2	51,6	74,0	77,1
2	Поверх	6	10	10	10	9	4	8	5	5	8	8	4	7
3	Кількість кімнат	2	3	2	2	3	3	3	2	2	2	1	2	2
4	Орієнтовна вартість згідно до аналізу ринку від до	3 802 305– 5 517 979	3 829 141– 5 556 924	2 671 257– 3 876 581	2 620 473– 3 802 882	3 588 762– 5 208 081	3 793 890– 5 505 767	4 244 583– 6 159 821	3 777 073– 5 481 362	2 532 623– 3 675 392	2 562 894– 3 719 321	1 735 503– 2 518 596	2 488 899– 3 611 939	2 593 164– 3 763 250
5	Оціночна вартість від до	4 850 292 – 8 083 820	4 922 563 – 8 204 271	2 816 491 – 4 694 151	3 060 349 – 5 100 581	4 477 106 – 7 461 844	4 877 246 – 8 128 744	6 060 526 – 10 100 876	4 345 264 – 7 242 106	2 717 960 – 4 529 933	2 644 625 – 4 407 709	2 032 251 – 3 387 085	2 731 871 – 4 553 118	2 845 134 – 4 741 890
6	Ринкова вартість	4 896 225	4 651 011	3 436 490	3 386 327	4 615 876	4 951 356	5 484 273	5 043 281	3 516 435	3 558 464	2 519 318	3 462 016	3 600 493
7	Вартість компенсації	4 238 270	4 164 275	2 972 440	2 915 930	3 902 858	4 153 230	4 646 610	4 230 735	2 836 815	2 870 721	2 143 215	2 787 840	2 904 628

Згідно до розрахунків ринкова вартість квартир знаходиться в діапазоні оціночної вартості визначеної за допомогою Єдиної бази даних звітів про оцінку з урахуванням допустимого 25 % діапазону.

Таким чином на прикладі об'єкта постраждалого унаслідок збройної агресії Російської федерації у м. Дніпро запропоноване та виконане визначення різних видів вартості та компенсації за знищений об'єкт нерухомого майна. Всі квартири знаходяться в аварійному стані, непридатні для використання за цільовим призначенням внаслідок бойових дій,

терористичних актів, диверсій, спричинених збройною агресією Російської Федерації проти України, та відновлення їх економічно недоцільне квартири відноситься до категорії знищений об'єкт нерухомого майна.

Отже на базі практичного дослідження розроблений алгоритм визначення ринкової вартості та компенсації за знищені об'єкти нерухомого майна. Результати розрахунків дозволять мешканцям об'єкта отримати сертифікати на компенсацію зруйнованого майна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про компенсацію за пошкодження та знищення окремих категорій об'єктів нерухомого майна внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій, спричинених збройною агресією Російської Федерації проти України». Київ, 23 лютого 2023 року № 2923-IX.

2. Звіт за результатами попереднього технічного обстеження пошкодженої внаслідок збройної агресії російської федерації квартири за адресою м. Дніпро, Шевченківський район, вул. Виконкомівська, буд. 24А, виконаний ФОП Сопільняк А. М.

3. Наказ ФДМУ 17.05.2018 № 658 «Про затвердження Порядку ведення єдиної бази даних звітів про оцінку».

4. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку надання компенсації за знищені об'єкти нерухомого майна» № 600 від 30 травня 2023 р.

5. Наказ ФДМУ № 3904/1223 від 18.10.2022 р. «Про затвердження Методики визначення шкоди та обсягу збитків, завданих підприємствам, установам та організаціям усіх форм власності внаслідок знищення та пошкодження їх майна у зв'язку із збройною агресією Російської Федерації, а також упущеної вигоди від неможливості чи перешкод у провадженні господарської діяльності».

REFERENCES

1. *Zakon Ukrainy "Pro kompensatsiiu za poshkozhdennia ta znyshchennia okremykh katehorii obiektiv nerukhomoho maina vnaslidok boiovykh dii, terorystychnykh aktiv, dyversii, sprychynenykh zbroinoiu ahresiieiu Rosiiskoi Federatsii proty Ukrainy"* [Law of Ukraine "On Compensation for Damage and Destruction of Certain Categories of Real Estate Objects as a Result of Hostilities, Terrorist Acts, and Sabotage Caused by Armed Aggression of the Russian Federation against Ukraine"]. Kyiv, February 23, 2023, no. 2923-IX. (in Ukrainian).

2. *Zvit za rezultatamy poperednoho tekhnichnoho obstezhennia poshkozhdzhenoi vnaslidok zbroinoi ahresii rosiiskoi federatsii kvartyry za adresoiu m. Dnipro, Shevchenkivskiy raion, vul. Vykonkomivska, bud. 24A vykonanyi FOP Sopilniak A.M.* [Report on the results of the preliminary technical inspection of the apartment damaged as a result of the armed aggression of the Russian Federation at the address : Dnipro, Shevchenkivskiy district, Vykonkomivska St., building 24A, executed by the individual entrepreneur Sopilnyak A.M.]. (in Ukrainian).

3. *Nakaz FDMU 17.05.2018 № 658 "Pro zatverdzhennia Poriadku vedennia yedynoi bazy danykh zvitiv pro otsinku"* [Order of the State Property Fund of Ukraine dated 17.05.2018 no. 658 "On approval of the Procedure for maintaining a unified database of assessment reports"]. (in Ukrainian).

4. *Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy "Pro zatverdzhennia Poriadku nadannia kompensatsii za znyshcheni obiekty nerukhomoho maina" № 600 vid 30 travnia 2023 r.* [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On Approval of the Procedure for Providing Compensation for Destroyed Real Estate Objects" no. 600 of May 30, 2023]. (in Ukrainian).

5. *Nakaz FDMU № 3904/1223 vid 18.10.2022 r. "Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia shkody ta obsiahu zbytkiv, zavdanykh pidpriemstvam, ustanovam ta orhanizatsiiam usikh form vlasnosti vnaslidok znyshchennia ta poshkozhdennia yikh maina u zviazku iz zbroinoiu ahresiieiu Rosiiskoi Federatsii, a takozh upushchenoi vyhody vid nemozhlyvosti chy pereshkod u provadzhenni hospodarskoi diialnosti"* [Order of the State Budget and State Budget Service No. 3904/1223 of October 18, 2022 "On approval of the Methodology for determining the damage and amount of losses caused to enterprises, institutions and organizations of all forms of ownership as a result of the destruction and damage to their property in connection with the armed aggression of the Russian Federation, as well as lost profits from the impossibility or obstacles in conducting economic activities"]. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 06.02.2025.

УДК 378.22

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.83.1147

ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНО-ПЕДАГОГІЧНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ ЗДОБУВАЧІВ МАГІСТЕРСЬКОГО РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

ЛИСЕНКО Г. І.^{1*}, канд. іст. наук, доц.,

ВОЛКОВА С. П.², ст. викл.,

КОВБА В. В.³, канд. техн. наук, доц.,

БЕКІРОВ В.⁴, студ.

^{1*} Кафедра українознавства, документознавства та інформаційної діяльності, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-94-98, e-mail: lysenko.halyna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6216-5025

² Кафедра українознавства, документознавства та інформаційної діяльності Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-94-98, e-mail: svitlana.volkova@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0829-5627

³ Кафедра інженерної геології і геотехніки, 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) 588-46-71, e-mail: kovba.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5140-8140

⁴ Кафедра інженерної геології і геотехніки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: bekirov.veli@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-6123-5943

Анотація. Постановка проблеми. Українська система вищої освіти вже понад тридцять років як переживає болісний процес реформування, намагаючись досягти міжнародних стандартів якості і гармонізувати національний освітнянський простір із загальносвітовим. На цьому шляху спільнота вітчизняних науковців у сфері освіти уважно вивчає позитивний досвід зарубіжних розвинених країн і трансформує його здобутки з метою удосконалення освітнянського сектору України. У контексті реформування системи вищої професійної освіти Україні потрібно готувати конкурентоспроможних викладачів, професійно вмотивованих, ще з магістерського рівня вищої освіти, у відповідності до нормативних документів, зокрема Національної рамки кваліфікації та системи стандартів вищої освіти України. **Мета статті** – охарактеризувати теоретико-практичні засади формування професійно-педагогічної компетентності здобувачів магістерського рівня вищої освіти (на прикладі технічного ЗВО – ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»); дослідити набуття первинного досвіду педагогічної діяльності студентами старших курсів, які виступили у ролі викладачів для молодших курсів у вищій школі; проаналізувати ефективність такого підходу в освітньому процесі, а також визначити його вплив на академічну успішність і професійний розвиток обох груп здобувачів вищої освіти. Важливо підкреслити, що дане дослідження виконується в рамках роботи Лабораторії педагогічної майстерності кафедри українознавства, документознавства та інформаційної діяльності ПДАБА, одним із завдань якої є сприяння підвищенню якості підготовки майбутніх науково-педагогічних кадрів, зокрема, в умовах магістратури. **Висновки.** У дослідженні доводиться важливість формування професійно-педагогічної компетентності у здобувачів магістерського рівня вищої освіти (відповідно до законодавства України), особливо під час здобуття технічної спеціальності. Взаємодія між старшими та молодшими курсами сприяє розвитку педагогічних навичок, що дає можливість отримати магістрантами первинний досвід педагогічної діяльності, що важливо як для їхньої подальшої професійної кар'єри так і підвищення впевненості у викладацькій діяльності. Результати дослідження підтверджують доцільність і ефективність інтеграції практичних педагогічних елементів у навчальний процес, що сприяє формуванню компетентних фахівців.

Ключові слова: професійно-педагогічна компетентність; здобувачі магістерського рівня вищої освіти; первинний досвід педагогічної діяльності; технічні спеціальності; особистісно-орієнтована гуманістична моделі освіти; лабораторія педагогічної майстерності

THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF FORMATION OF PROFESSIONAL AND PEDAGOGICAL COMPETENCE OF MASTER'S LEVEL HIGHER EDUCATION GRADUATES IN TECHNICAL SPECIALTIES

LYSENKO G.I.^{1*}, *Cand. Sc. (Hist.), Assoc. Prof.*,
VOLKOVA S.P.², *Senior Lecturer*,
KOVBA V.V.³, *Ph. D., Assoc. Prof.*,
BEKIROV V.⁴, *Stud.*

^{1*} Department of Ukrainian Studies, Documentation and Information Activity, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-94-98, e-mail: lysenko.halyna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6216-5025

² Department of Ukrainian Studies, Documentation and Information Activity, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-94-98, e-mail: svitlana.volkova@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0829-5627

³ Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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) 588-46-71, e-mail: kovba.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5140-8140

⁴ Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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, e-mail: bekirow.veli@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-6123-5943

Abstract. Formulation of the problem. The Ukrainian higher education system has been undergoing a painful process of reform for over thirty years, trying to achieve international quality standards and harmonize the national educational space with the global one. Along the way, the community of domestic scholars in the field of education carefully studies the positive experience of foreign developed countries and transforms its achievements in order to improve the educational sector of Ukraine. In the context of reforming the higher professional education system, Ukraine needs to train competitive, professionally motivated teachers, starting from the master's level of higher education, in accordance with regulatory documents, in particular the National Qualification Framework and the system of standards for higher education in Ukraine. **The purpose of the article** is to characterize the theoretical and practical principles of the formation of professional and pedagogical competence of master's level higher education applicants (using the example of a technical higher education institution – ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture"); to investigate the acquisition of primary experience in pedagogical activity by senior students who acted as teachers for junior courses in higher education; to analyze the effectiveness of such an approach in the educational process, as well as to determine its impact on the academic success and professional development of both groups of higher education applicants. It is important to emphasize that this study is carried out within the framework of the Laboratory of Pedagogical Mastery of the Department of Ukrainian Studies, Document Studies and Information Activities of the ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", one of the tasks of which is to contribute to improving the quality of training of future scientific and pedagogical personnel, in particular, in the conditions of a master's degree. **Conclusions.** The study proves the importance of forming professional and pedagogical competence in master's level higher education applicants (in accordance with the legislation of Ukraine), especially during the acquisition of a technical specialty. Interaction between senior and junior courses contributes to the development of pedagogical skills, which allows master's students to gain primary experience of pedagogical activity, which is important both for their further professional career and for increasing confidence in teaching. The results of the study confirm the feasibility and effectiveness of integrating practical pedagogical elements into the educational process, which contributes to the formation of competent specialists.

Keywords: *professional and pedagogical competence; master's level higher education applicants; primary experience of pedagogical activity; technical specialties; personality-oriented humanistic model of education; laboratory of pedagogical skills*

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку України удосконалення системи вищої освіти потребує «комплексного проектування моделей всіх її ланок, моделювання процесу підготовки майбутніх фахівців таким чином, щоб він

забезпечував професійну й життєву компетентність, якісні професійні знання й уміння, професійну мобільність і стійкість, конкурентоздатність і конкурентоспроможність випускників закладів освіти» [5, с. 5]. Українська система вищої освіти

вже понад тридцять років як переживає болісний процес реформування, намагаючись досягти міжнародних стандартів якості і гармонізувати національний освітянський простір із загальноосвітнім. На цьому шляху спільнота вітчизняних науковців у сфері освіти уважно вивчає позитивний досвід зарубіжних розвинених країн і трансформує його здобутки з метою удосконалення освітянського сектору України. У контексті реформування системи вищої професійної освіти Україні потрібна генерація конкурентоспроможних викладачів, професійно вмотивованих, які здатні забезпечити якісну професійну підготовку молодих фахівців у відповідності до потреб держави, спрямовуючи особистим прикладом молодь до постійного самовдосконалення.

Аналіз публікацій. Професійний стандарт на групу професій «Викладачі закладів вищої освіти», що був затверджений 23 березня 2021 р., ще на стадії проекту пройшов експертизу фахівцями Британської Ради в Україні (British Council) [8]. Також слід зауважити, що упродовж 2019–2023 рр. за сприяння Британської Ради, у співпраці із Інститутом вищої освіти НАПН України та за підтримки Міністерства освіти і науки України і Національного агентства із забезпечення якості вищої освіти було реалізовано проєкт “Програма вдосконалення викладання у вищій освіті” [1].

Зважаючи на ґрунтовний підхід в сучасній педагогічній теорії і практиці щодо професійної підготовки вчителів і викладачів безпосередньо в системі педагогічної освіти, ряд дослідників слушно наголошують на значних прогалинах в процесі підготовки до науково-педагогічної діяльності викладачів в системі технічної освіти, зокрема, вищої. Так, Ірина Михайлюк (2010) вважає, що «говорити про належний рівень сформованості готовності до педагогічної діяльності у магістрів вищих технічних навчальних закладів (ВТНЗ) можна лише умовно»; водночас, дослідниця

запропонувала на основі системного підходу модель формування готовності майбутніх магістрів технічного спрямування до реалізації педагогічної діяльності, де визначальними чинниками виступають чітко окреслені педагогічні умови, серед яких основна роль належить комунікативно-інформаційному компоненту [4]. Питання важливості вивчення педагогічних дисциплін здобувачами освіти на другому і третьому рівнях вищої освіти, проблема підвищення професійно-педагогічної компетентності викладачів сучасних закладів вищої технічної освіти, зокрема шляхом організації лабораторії педагогічної майстерності, розглянуто у низці статей співавторів даного дослідження [3; 12]. Серед новітніх досліджень привертає увагу робота Ганни та Сергія Красильникових (2024), присвячена проблемі формування педагогічної компетентності у здобувачів магістерського рівня вищої освіти різних спеціальностей [2]. В означеному дослідженні слушно зазначено, що освітні компоненти педагогічного спрямування включаються до магістерських освітніх програм на вимогу освітніх стандартів; крім того, з метою придбання практичного досвіду набутих компетентностей передбачено проходження магістрами педагогічної практики в закладах вищої освіти обсягом 3 кредити ЕКТС [2, с. 27].

Мета статті – охарактеризувати теоретико-практичні засади формування професійно-педагогічної компетентності здобувачів магістерського рівня вищої освіти (на прикладі технічного ЗВО – ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»); дослідити набуття первинного досвіду педагогічної діяльності студентами старших курсів, які виступили у ролі викладачів для молодших курсів у вищій школі; проаналізувати ефективність такого підходу в освітньому процесі, а також визначити його вплив на академічну успішність і професійний розвиток обох груп здобувачів вищої освіти. Важливо підкреслити, що дане дослідження виконується в рамках роботи *Лабораторії педагогічної майстерності кафедри*

українознавства, документознавства та інформаційної діяльності ПДАБА, одним із завдань якої є сприяння підвищенню якості підготовки майбутніх науково-педагогічних кадрів, зокрема, в умовах магістратури.

Виклад основного матеріалу.

Зважаючи на запровадження ще на початку 1990-х років ступеневої системи освіти в незалежній українській державі, важливо звернутися до здобутків провідних держав у сфері теоретичної і практичної підготовки фахівців різних ступенів вищої освіти. Особливу увагу привертають програми підготовки магістрів, які готують не тільки фахівців вищого рівня (у порівнянні з бакалаврами), але й потенційних майбутніх викладачів та/або управлінців у сфері освіти. Оскільки стаття 55 Закону України «Про вищу освіту» від 1 липня 2014 року, прямо зазначає, що посади науково-педагогічних працівників можуть займати особи, які мають науковий ступінь або вчене звання, а також особи, які мають ступінь магістра, сьогоднішня магістратура покликана здійснювати фундаментальну психолого-педагогічну та науково-практичну підготовку викладачів професійної школи, забезпечувати безперервність освіти й фахову спрямованість викладацької діяльності. Але наскільки проголошені завдання магістратури в справі підготовки науково-педагогічних працівників для закладів вищої технічної освіти України реалізуються на практиці? Проведемо короткий огляд підготовки майбутніх викладачів технічних дисциплін за кордоном.

Основною вимогою щодо початку педагогічної діяльності в австрійських закладах вищої професійної та середньої професійної освіти технічного спрямування є наявність у претендента диплома магістра за технічною спеціальністю, а також трирічний досвід роботи у відповідній галузі. Якщо означені вимоги виконані, претендента допускають до викладання у професійних освітніх закладах з повною денною формою навчання, але паралельно з викладацькою роботою необхідно розпочати та успішно пройти курс бакалавра освіти

(BEd) в університетському коледжі педагогічної освіти (де передбачено 30 кредитів ECTS освітніх досліджень і педагогіки та 30 кредитів ECTS дидактичних курсів) [9, с. 12–15].

Професійна підготовка викладачів та професійні вимоги до майбутніх викладачів у Німеччині є більш інституціолізованими та складнішими у порівнянні з іншими європейськими країнами. Обов'язковими умовами отримання посади викладача є відповідний ступінь магістра, принаймні один рік відповідного практичного досвіду у предметній спеціалізації, щонайменше 18 місяців практичного навчання – відповідно, підготовка акредитованого викладача для закладів професійної освіти триває мінімум 7 років. *Перший етап* підготовки викладача професійної освіти передбачає навчання на бакалавраті та в магістратурі за педагогічними спеціалізаціями; на *другому етапі* здійснюється підготовче стажування (на базі навчального закладу); *третій етап* пов'язаний з подальшим підвищенням кваліфікації [9, с. 25–26; 11].

Всупереч курсу на розбудову феноменологічної, а саме – особистісно-орієнтованої гуманістичної моделі освіти в Україні (з 1991 р.), що має на меті зламати технократичний підхід, реальністю сучасної вищої технічної школи залишається авторитарний стиль викладання, переважання традиційних методів навчання, оцінювання студентських результатів за власними критеріями, предметоцентрична орієнтація, відчуття певної самодостатності, гальмування професійного розвитку викладачів. Так, студенти магістратури Придніпровської державної академії будівництва та архітектури до сучасних недоліків викладацької діяльності віднесли: предметоцентричну орієнтацію (характерна для 40 % викладачів), стереотипність у професійній позиції (30 %), відчуття певної самодостатності (15 %), «емоційне вигорання» (10 %), поява комплексу загрози авторитету (5 %) тощо (опитування проводилось у 2021–2024 рр. під час занять з курсу «Педагогіки вищої школи»).

Результати опитування доводять наявність низки проблем щодо раціональної організації студентоцентрованого освітнього середовища в сучасній вищій школі і підтверджують тезу авторів даного дослідження щодо необхідності пошуку шляхів удосконалення професійно-педагогічної компетентності вітчизняних викладачів технічних дисциплін [3; 7].

На думку студентів, до важливих недоліків сучасної викладацької діяльності

слід також віднести нездатність встановити діалог із студентами; ця проблема вбачається здобувачами освіти у надмірному домінуванні викладача, небажанні вислухати думку студентів; часто викладачі виявляють грубість та неповагу до студентської особистості, неадекватне розуміння світогляду студента.

1. Чи доводилося вам впродовж вашого навчання спостерігати деякі недоліки викладацької діяльності, наприклад:

[Дополнительные сведения](#)

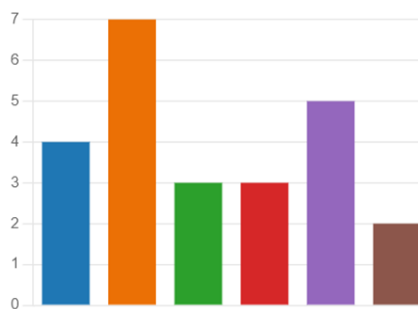
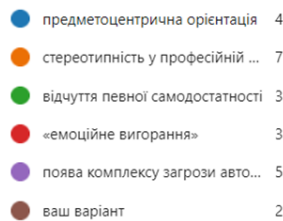


Рис. 1. Опитування здобувачів магістерського рівня щодо недоліків викладацької діяльності

Щодо організації педагогічної підготовки магістрантів ЗВТО як потенційних майбутніх науково-педагогічних працівників, то за наявності у магістерській програмі 3-х кредитів з блоку вибіркових педагогічних дисциплін («Педагогіка вищої школи» / «Методика викладання у вищій школі»), з яких аудиторні години представлені лише лекціями (30 годин), важко собі уявити, яким чином магістрантами може бути отриманий педагогічний досвід і як будуть сформовані педагогічні компетенції у них для подальшої ймовірної викладацької діяльності.

Освітні компоненти педагогічного спрямування займають виняткове місце в процесі професійної підготовки здобувачів магістерського рівня вищої освіти, незалежно від спеціальності. Доведено, що випускникам технічних спеціальностей складніше встановлювати зв'язки типу «людина – людина», оскільки взагалі вони більше тяжіють до технічних наук, які історично протиставлялись гуманітарним

наукам та наукам про людину; відповідно, освітні програми технічних спеціальностей традиційно недоукомплектовані гуманітарними та психолого-педагогічними дисциплінами. Як наслідок, випускники магістратури технічних вишів, які в подальшому вирішують зайнятися викладацькою діяльністю, не усвідомивши значущість професії науково-педагогічного працівника та не сформувавши готовність до педагогічної діяльності на належному рівні, відчувають значні проблеми на початковому етапі викладацької кар'єри, що може мати негативні наслідки для наступних поколінь студентів. На нашу думку, теоретичний курс «Педагогіка вищої школи», підкріплений практичними заняттями, міг би значно покращити ситуацію із формуванням професійно-педагогічної компетентності здобувачів вищої освіти на магістерському рівні у технічних вишах. Логічне поєднання лекційних і практичних занять педагогічного профілю дозволить сформувати у магістрантів первинні

уявлення про здійснення науково-педагогічної діяльності у закладах вищої освіти; забезпечить формування у здобувачів ВО критичності та гнучкості мислення; здатності до аналізу й синтезу науково-педагогічної інформації, здатності застосовувати педагогічні знання на практиці; забезпечить практичне усвідомлення соціальної значущості викладацької професії [6].

Взагалі, дуже важливо наприкінці кожного навчального курсу, що викладається на першому (бакалаврському), а особливо на другому (магістерському) рівнях вищої освіти встановлювати рефлексивний зв'язок з метою отримання інформації про ступінь зрозумілості студентами місця дисципліни (як освітнього компоненту) в освітній програмі, а також урахування пропозицій здобувачів освіти щодо удосконалення курсу і т. ін. Як показує практика, студенти зрідка наважуються відверто критично висловитися впродовж занять в присутності однокурсників, але досить широко діляться своїми думками під час заповнення анкет зворотного зв'язку вже після отримання підсумкової оцінки.

В результаті опитування впродовж 2021–2024 рр. студенти магістратури відзначили використання під час їхнього навчання таких сучасних педагогічних технологій:

- технологія особистісно орієнтованого навчання – 10 %;
- технологія диференційованого навчання – 40 %;
- технологія проблемного (дослідницького, евристичного) навчання – 20 %;
- ігрові технології навчання (ділова гра «Дельта» зі студентами економічних спеціальностей) – 5 %;
- дискусійні технології навчання – 5 %;
- модульні технології навчання – 5 %;
- технологія ситуаційного навчання (кейс-технологія) – 10 %;
- інформаційні технології навчання – 60 %;

- технологія дистанційного навчання в умовах карантину і воєнного стану – 100 %;
- «школа ейдетики» як інноваційна освітня технологія – 4 %.

Під час опитування студенти відзначали, що дуже часто технології поєднуються і тісно переплітаються, інколи навіть важко виділити щось одне з процесу навчання.

Результати опитування магістрантів ПДАБА упродовж 2022–2024 рр. підтверджують загальну тенденцію щодо неусвідомлення викладачами технічного профілю важливості застосування особистісно-орієнтованих технологій навчання, що ускладнює побудову індивідуальних освітніх траєкторій здобувачів ВО.

Метою практичних занять з педагогіки повинно бути формування професійно-педагогічної компетентності у процесі застосування здобувачами психолого-педагогічних і спеціальних знань під час вирішення конкретних педагогічних завдань; а також використання творчого підходу для успішного формування особистості фахівця / магістра за певною технічною спеціальністю і потенційного викладача технічних дисциплін у ВШ. Вхідження в роль викладача технічних дисциплін передбачає акумулювання студентом як власного навчального досвіду, так і опору на найкращі зразки викладацької діяльності, які накопичились у студента впродовж періоду здобуття бакалаврської освіти.

В умовах відсутності в навчальному плані підготовки магістрів ПДАБА годин для практичних занять, з ініціативи співавторки цієї роботи було організовано педагогічний експеримент, який полягав у пропозиції магістрантам підготувати і прочитати міні-лекції для одногрупників. Означене завдання мало на меті сформувані у магістрів технічних спеціальностей – потенційних майбутніх викладачів – позитивне ставлення до педагогічної діяльності, сформувані у них продуктивне професійне мислення. Головною умовою завдання було визначено вільне обрання теми для прочитання міні-лекції, що

спрямовувалося на формування у них педагогічної творчості, щоб поставлені завдання не обмежували їх фантазію, а, навпаки, сприяли її пробудженню. Вибірка тем студентських міні-лекцій, підготовлених і прочитаних здобувачами магістерського рівня упродовж 2022–2024 рр. (а саме – «Викладач ЗВО 2022 – Хто ти?», «Проблеми вивчення гуманітарних наук у технічних закладах ВО», «Освіта людей похилого віку», «Боротьба зі стресом під час війни за допомогою спорту», «Ігрові технології навчання у ЗВО» та ін.) свідчить про усвідомлене обрання ними актуальних для сучасної вищої школи України проблем і, водночас, підтверджує нашу гіпотезу про важливість створення продуктивного освітнього середовища для забезпечення особистісного і професійного зростання молоді.

На підтвердження викладацької точки зору щодо важливості забезпечення практикоорієнтованості освітнього процесу у вищій школі, наводимо у роботі рефлексивно-аналітичний матеріал, підготовлений магістрантом-співавтором статті, на тему ***«Практичний досвід старшокурсників у процесі навчання студентів молодших курсів у вищій школі»***.

Цей матеріал є результатом глибокого аналізу та саморефлексії, в якому магістрант ділиться власними спостереженнями та висновками щодо впливу практичного викладання на формування професійних компетентностей. У ньому підкреслюється, що участь старшокурсників у навчальному процесі молодших студентів не лише сприяє закріпленню знань, але й дозволяє розвивати їхні педагогічні навички, комунікативні здібності та здатність до критичного мислення.

Актуальність теми полягає у зростаючій ролі студентів в сучасному освітньому процесі, де старшокурсники виступають не тільки як здобувачі, але й як ментори для молодших студентів. Цей формат сприяє інтеграції нових студентів у академічне середовище, забезпечує більш неформальний та доступний підхід до

навчання, а також допомагає старшокурсникам закріпити свої педагогічні знання через практичний досвід викладання.

Вибір технології подання інформації відіграє ключову роль у навчальному процесі, оскільки сучасні цифрові інструменти дозволяють адаптувати матеріал до потреб і можливостей студентів. Використання мультимедійних презентацій, інтерактивних платформ та онлайн-ресурсів робить подачу матеріалу більш динамічною та візуально привабливою. Наприклад, за допомогою інструментів, як-от Google Classroom, Zoom, або інтерактивних дошок (наприклад, Jamboard або Miro), викладач може забезпечити миттєвий доступ до матеріалів, а також активну участь студентів у навчальному процесі. Такий підхід сприяє швидкому зворотному зв'язку та більш тісній співпраці, особливо під час групових завдань і проєктів.

Крім того, вибір технологій дозволяє врахувати індивідуальні потреби студентів, зокрема їхні навички користування цифровими інструментами і стиль навчання. Наприклад, інтерактивні тести, відеолекції або симуляції на спеціальних навчальних платформах допомагають зробити матеріал доступнішим, а студентам — краще засвоювати інформацію в зручному для них темпі. Такі технології, як додатки для запису лекцій, віртуальні лабораторії чи освітні мобільні додатки, дозволяють студентам поглиблено вивчати матеріал поза межами аудиторії. Таким чином, правильний вибір технологій забезпечує не лише гнучкість та доступність навчання, а й сприяє розвитку самостійності студентів та навичок самоорганізації.

Етимологія слова «технологія» означає «знання обробки матеріалу». Слово «технологія» прийшло до нас від греків, і якщо судити за складовими його коріння («технос» – мистецтво, майстерність, «логос» – навчання), воно було розраховано на більш універсальне використання/застосування відомих методів для досягнення позитивного результату.

Провідною формою організації процесу навчання у ЗВО є лекція. Вона забезпечує

системне подання наукових знань у викладенні науково-педагогічних працівників. Матеріал під час лекції подають науково, концентровано, логічно й аргументовано. У підготовці до заняття слід врахувати зміст, структуру, добір прикладів та ілюстрацій, методичне оформлення, розрахунок часу, склад та особливості студентів тощо [10].

Для того щоб донести інформацію студентам найбільш ефективно, магістрант-практикант вирішив використати сучасні методи викладання, орієнтовані на потреби сьогоденних студентів. Розуміючи, що аудиторія молодих фахівців більш чутлива до інтерактивних підходів і практичних прикладів, він побудував заняття таким чином, щоб воно було максимально залучаючим і зрозумілим. Основний акцент був зроблений на інтерактивності, що дозволило студентам брати активну участь у процесі навчання, ставити запитання і безпосередньо взаємодіяти з матеріалом. Це допомогло їм краще засвоювати знання і бачити практичну цінність тих технологій, про які йшлося. Для цього було використано Autodesk Viewer. Autodesk Viewer – це безкоштовний онлайн-інструмент для перегляду 2D- і 3D-дизайнів у різних форматах (таких як DWG, RVT, IPT) без необхідності встановлення спеціального програмного забезпечення. Це дало

можливість відкрити 3D-модель конструкцій у студентів на телефонах та подивитися на реальність проєкту, як він виглядає ззовні та розбити модель на складові.

Використання інформаційно-комунікаційних технологій під час самостійної роботи студентів значно полегшує процес отримання необхідної інформації, оскільки існує величезна кількість літератури, зокрема наукової та навчальної, що подана в електронному вигляді. Під час заняття практикант приділив особливу увагу поясненню основних концепцій BIM-моделювання, підкріплюючи теорію реальними прикладами його застосування в геотехнічних і геологічних дослідженнях.

Студенти змогли побачити, як ці технології не лише допомагають моделювати складні геологічні умови, але й оптимізують процес прийняття рішень на всіх етапах проєктування. Використовуючи мульти-медійні презентації та демонстрації програмного забезпечення, магістрант створив умови для активної участі студентів, що додатково стимулювало їхній інтерес до теми. Практичні завдання допомогли студентам краще зрозуміти, як BIM-моделювання можна застосовувати у вирішенні геотехнічних проблем.

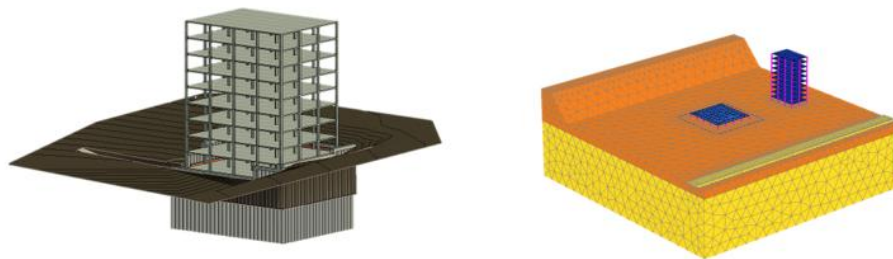


Рис. 2. Використані 3D-моделі для теми заняття

Коротка лекція перед початком роботи є важливою, оскільки дозволяє встановити загальне розуміння завдання, його мету та основні етапи виконання. Це допомагає студентам сфокусуватися на ключових аспектах роботи, розуміти очікування та уникнути можливих помилок або

нерозуміння. Така вступна частина також дає змогу викладачу акцентувати увагу на важливих деталях, надати контекст або пояснити складні моменти, що будуть корисними в подальшій роботі. Зрештою, коротка лекція на початку мотивує студентів, надає їм впевненості та допомагає

організувати їхній робочий процес ефективніше.

Щодо виду лекції практикант свідомо обрав для проведення свого заняття *елементи оглядової та інструктивної лекцій*. Інструктивна лекція доцільна для слухачів-початківців, які ще не обізнані в питаннях організації пізнавальної діяльності під час аудиторних занять і самопідготовки, не мають навичок конспектування, роботи в бібліотеці тощо. Вона також готує студентів до творчого розв'язання навчально-пізнавальних задач. Особливого значення цей різновид вступної лекції набуває тоді, коли з певної навчальної дисципліни передбачається написання курсової роботи.

Серед традиційних лекцій окреме місце посідають оглядові лекції. Як правило, цей вид занять передбачається по тих навчальних дисциплінах, які виносяться на державну атестацію. На оглядових лекціях основною метою стає актуалізація опірних знань, а також систематизація наукових знань на більш високому рівні з опорою на науково-понятійному і концептуальному базисі всього курсу чи його розділів [10].

Поєднання оглядової та інструктивної лекцій є доречним вибором, оскільки дозволяє одночасно надати студентам загальне уявлення про тему та чіткі інструкції для подальшої роботи. Оглядова частина лекції забезпечує контекст та розкриває ключові ідеї, що допомагає студентам зрозуміти, чому дана тема важлива та які проблеми вона вирішує. Це підготує слухачів до роботи, формує загальну картину та викликаючи інтерес, а

також дозволяє побачити, як новий матеріал пов'язаний з їхнім навчанням або майбутньою практичною діяльністю.

Розглядання простих побутових ситуацій як об'єкта пояснення є зручним і ефективним інструментом у навчанні, оскільки це дозволяє студентам легко зрозуміти складні теоретичні концепції через знайомі, реальні приклади. Коли матеріал подається на основі побутових ситуацій, студенти швидше встановлюють зв'язок із власним досвідом, що допомагає їм краще засвоїти нову інформацію та зменшує страх перед складністю теми. Власний досвід магістранта показав, наскільки ефективним може бути наочний приклад із простими предметами, як-от банан, для пояснення складних концепцій, таких як різниця між реальністю, CAD-форматом та BIM-форматом у створенні креслень. Щоб донести ці відмінності студентам, практикант влучно використав банан як аналог реального об'єкта, який можна побачити і відчувати. Коли ми говоримо про CAD-формат, це як тривимірне зображення банана – його можна побачити на екрані, обертати, але воно залишається статичним та не містить додаткової інформації, окрім форми. BIM-формат, навпаки, показує банан не лише візуально, а й з усіма важливими атрибутами: інформацією про його характеристики, структуру, зрілість, навіть можливі параметри зберігання – тобто створює цифрову модель, яка передає всі дані про об'єкт.



Рис. 3. Використання реального аналогу для формування у студентів асоціативного ряду

Такий приклад викликав у студентів асоціативний ряд, який зробив інформацію зрозумілішою і наочнішою. Оскільки вони змогли «побачити» різницю між форматами на звичному предметі, це суттєво полегшило засвоєння теми. Використання банана як метафори допомогло студентам не лише зрозуміти матеріал, але й міцно запам'ятати його, оскільки асоціативний зв'язок між предметом і концепціями CAD та BIM робить інформацію більш зрозумілою на інтуїтивному рівні. Такі асоціації залишаються в пам'яті надовго, перетворюючи складні терміни на прості й зрозумілі образи.

Після проведеного заняття магістрант ініціював зворотний зв'язок з аудиторією з метою отримання інформації про враження здобувачів від його роботи. На думку практиканта, коли викладач проявляє інтерес до думки студентів, він демонструє повагу та готовність до вдосконалення своєї методики викладання, що допомагає створити довірливу атмосферу. Такий підхід дозволяє студентам відчувати себе почутими та важливими, адже викладач показує, що йому не байдужа їхня думка.

Завдяки цьому зворотний зв'язок стає не просто формальною процедурою, а конструктивним діалогом, який допомагає викладачеві краще розуміти потреби студентів і адаптувати підхід до їхніх очікувань. Для студентів це також можливість без страху висловити свої думки та побажання, що знижує бар'єри в комунікації та сприяє створенню більш сприятливого навчального середовища. Такий формат спілкування значно підвищує мотивацію, адже студенти почуваються більш залученими до процесу навчання, а викладач отримує можливість удосконалювати свої методи, враховуючи живий і актуальний фідбек.

Студентка 4-го курсу будівельного факультету ПДАБА влучно оцінила первинний педагогічний досвід магістранта: *«Сьогодні нам провели презентацію про застосування BIM технологій у геотехніці, що була надзвичайно цікавою та інформативною. Автору вдалося*

продемонструвати, як ці технології допомагають у складних проєктах, забезпечуючи ефективність та точність при роботі з об'єктами. Дуже сподобалось чітке порівняння CAD та BIM технологій, що підкреслило, як BIM виходить за рамки простого малювання та дозволяє створювати інтегровані 3D моделі. Дипломний проєкт, продемонстрований на парі, є яскравим прикладом використання BIM технологій у практичній сфері. Цікаво було побачити, як студент вдало впровадив теоретичні знання у реалізацію проєкту. Варто зазначити, що викладення матеріалу під час презентації було дуже легким та зрозумілим. Доповідач гарно структурував інформацію та доніс її доступною мовою. Заняття було дуже корисним та надихнуло до поглиблення знань у сфері BIM технологій».

Висновки

Первинний досвід педагогічної діяльності може набуватися здобувачами магістерського рівня вищої освіти у різний спосіб – із залученням ігрових технологій (як-то стажування із виконанням ролі викладача); технологій проблемного навчання (частково-пошукові та дослідницькі методи); за допомогою методу навчання на робочому місці, методу взаємонавчання, методу портфоліо, методу використання інтелект-карт для пояснення матеріалу тощо.

Враховуючи здобутий первинний досвід викладання, магістрант запропонував внести ряд покращень до існуючих методів навчання у вищій школі. На сьогодні освітній процес вимагає адаптації до потреб нових поколінь, що відрізняються стилями сприйняття інформації та звичками до використання цифрових технологій. Ефективна модернізація підходів до викладання не тільки сприятиме кращому розумінню матеріалу, але й посилить залученість студентів до навчального процесу.

Перш за все, важливо врахувати, що сучасні студенти звикли до візуалізації та інтерактивних форм подачі інформації, які

можна реалізувати через цифрові інструменти, такі як Autodesk Viewer. Ця платформа дозволяє демонструвати складні конструкції та візуалізації у форматі, доступному для кожного студента без потреби встановлювати спеціальне програмне забезпечення. Завдяки такому підходу, можна значно покращити якість подачі матеріалу, спрощуючи процес його сприйняття і роблячи навчання більш доступним та зрозумілим.

Друге важливе питання стосується системи студентських відгуків. Удосконалення методів збору зворотного зв'язку від студентів може значно вплинути на подальшу роботу викладача та сприяти гнучкості у виборі педагогічних підходів. Регулярне отримання конструктивних відгуків дозволить викладачеві краще розуміти очікування аудиторії та адаптувати методи навчання відповідно до потреб студентів, що особливо актуально у контексті розвитку інноваційної педагогіки.

Третя рекомендація стосується запровадження змішаного формату лекцій, який поєднує традиційні начитки з активними дискусіями та обговоренням матеріалу. Такий підхід не тільки розвиває навички критичного мислення у студентів, а й стимулює їхню залученість до процесу навчання. Взаємодія зі студентами в рамках

лекції сприяє кращому засвоєнню матеріалу, оскільки обговорення дозволяють глибше розібратися у складних питаннях та отримати нові знання через обмін думками.

Фінальна пропозиція стосується переведення стосунків між студентами та викладачами у розряд менш формальних. Неформальний підхід до взаємодії створює сприятливу атмосферу для навчання, мотивує студентів відкрито висловлювати свої думки та не боятися задавати питання. Це сприяє розвитку довірливих відносин між студентом і викладачем, що позитивно впливає на ефективність навчального процесу та підвищує загальний рівень комунікації.

Таким чином, на думку здобувача магістерського рівня, запропоновані нововведення можуть суттєво вплинути на якість навчального процесу у вищій школі та сприяти формуванню гнучкої, адаптивної та орієнтованої на потреби студентів системи освіти. Рефлексивно-аналітичний матеріал магістранта підтверджує важливість практикоорієнтованого підходу в освіті, який сприяє всебічному розвитку студентів та підготовці їх до реальних викликів у професійній сфері. Цей досвід може стати основою для подальших досліджень і впровадження нових методик у навчальний процес вищої школи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Калашнікова С., Базелюк Н., Базелюк О. та ін. Вдосконалення викладання у вищій освіті: теорія та практика : монографія; за наук. ред. С. Калашнікової. Київ : Інститут вищої освіти НАПН України, 2023. 255 с. URL: <https://doi.org/10.31874/TE.202>
2. Красильникова Г., Красильников С. Інструментарій формування педагогічної компетентності у здобувачів магістерського рівня вищої освіти. *Молодь і ринок*. 2024. № 6 (226). С. 25–30 URL: <http://mir.dspu.edu.ua/article/view/307814>
3. Лисенко Г. Педагогіка вищої школи в системі професійної підготовки магістрів технічного профілю. *Український педагогічний журнал*. 2020. № 4. С. 150–161. URL: <https://doi.org/10.32405/2411-1317-2020-4>
4. Михайлюк І. Р. Педагогічні умови та модель формування готовності до педагогічної діяльності магістрів технічного спрямування. *Вісник Національної академії Державної прикордонної служби України*. 2010. № 3. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vnadps_2010_3_9
5. Моделювання професійної підготовки фахівців в умовах євроінтеграційних процесів : монографія; за ред. С. С. Вітвицької. Житомир : Вид. О. О. Євенок, 2019. 304 с.
6. Педагогічна практика : програма та методика реалізації : навч.-метод. посіб. Дніпро : Університет імені Альфреда Нобеля, 2019. 136 с.
7. Педагогічні студії з підготовки будівельно-архітектурних фахівців : дидактичний та виховний аспекти : колективна монографія; за заг. ред. Г. Євсєєвої, Г. Лисенко. Дніпро : ПДАБА, 2022. 483 с.
8. Професійний стандарт на групу професій «Викладачі закладів вищої освіти», затверджений 23.03.2021 р. URL: https://mon.gov.ua/storage/app/media/pto/standarty/2021/03/25/Standart%20na%20hrupu%20profesiy_Vykladachi%20zakladiv%20vyshchovi%20osvity_25.03.pdf

9. Управління підготовкою викладачів професійної освіти у країнах ЄС : загальний огляд. 2020. URL: <http://surl.li/bxkap>
10. Євсєєва Г. П., Лисенко Г. І. Теорія і методика викладання в сучасній вищій школі. Дніпро, 2020. 154 с.
11. Lysenko G. Features of training of vocational education teachers in Germany. *ScienceRise : Pedagogical Education*. 2022. № 3 (48). Pp. 37–43. URL: <https://doi.org/10.15587/2519-4984.2022.257349>
12. Yevseieva G., Lysenko G., Volkova S. Laboratory of Pedagogical Skills of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture : On the Way from Traditional Methods to Modern Educational Online Technologies. *Proceedings of the 37th International Business Information Management Association (IBIMA)*. Cordoba, Spain, 30–31 May 2021, pp. 10662–10667.

REFERENCES

1. Kalashnikova S., Bazeliuk N., Bazeliuk O. and oth. *Vdoskonalennia vykladannia u vyshchii osviti : teoriia ta praktyka : monohrafiia; za nauk. red. S. Kalashnikovoi* [Improving teaching in higher education : theory and practice : monograph, edited by S. Kalashnikova]. Kyiv : Instytut Vyshchoi Osvity NAPN Ukrainy, 2023, 255 p. URL: <https://doi.org/10.31874/TE.202> (in Ukrainian).
2. Krasylnykova H. and Krasylnykov S. *Instrumentarii formuvannia pedahohichnoi kompetentnosti u zdobuvachiv mahisterskoho rivnia vyshchoi osvity* [Toolkit for the formation of pedagogical competence in students of the master's level of higher education]. *Molod i rynek* [Youth and the Market]. 2024, no. 6 (226), pp. 25–30. URL: <http://mir.dspu.edu.ua/article/view/307814> (in Ukrainian).
3. Lysenko H. *Pedahohika vyshchoi shkoly v systemi profesiinoi pidhotovky mahistriv tekhnichnoho profilu* [Higher school pedagogy in the system of professional training of masters of technical profile]. *Ukrainskyi pedahohichnyi zhurnal* [Ukrainian Pedagogical Journal]. 2020, no. 4, pp. 150–161. ISSN 2411-1317. URL: <https://doi.org/10.32405/2411-1317-2020-4> (in Ukrainian).
4. Mykhailiuk I.R. *Pedahohichni umovy ta model formuvannia hotovnosti do pedahohichnoi diialnosti mahistriv tekhnichnoho spriamuvannia* [Pedagogical conditions and a model of formation of readiness for pedagogical activity of masters of technical direction]. *Visnyk Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of the State Border Service of Ukraine]. 2010, no. 3. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vnadps_2010_3_9 (in Ukrainian).
5. *Modeliuvannia profesiinoi pidhotovky fakhivtsiv v umovakh yevrointehratsiinykh protsesiv : monohrafiia; za red. S.S. Vitvytskoi* [Modeling of professional training of specialists in the context of European integration processes : monograph edited by S.S. Vitvytska]. Zhytomyr : O. O. Yevenok Publ., 2019, 304 p. (in Ukrainian).
6. *Pedahohichna praktyka : prohrama ta metodyka realizatsii: navchalnometodychnyi posibnyk* [Pedagogical practice : program and implementation methodology: teaching and methodological manual]. Dnipro : University named Alfred Nobel, 2019, 136 p. (in Ukrainian).
7. *Pedahohichni studii z pidhotovky budivelno-arkhitekturnykh fakhivtsiv : dydaktychnyi ta vykhovnyi aspekty: kolektyvna monohrafiia; za zah. red. H. Yevsieievoi i H. Lysenko* [Pedagogical studies for the training of construction and architectural specialists : didactic and educational aspects: collective monograph; ed. by G. Yevseieva and G. Lysenko]. Dnipro : PSACEA, 2022, 483 p. (in Ukrainian).
8. *Profesiinyi standart na hrupu profesii "Vykladachi zakladiv vyshchoi osvity", zatverdzhenyi 23.03.2021 r.* [Professional standard for the group of professions "Teachers of higher education institutions", approved on 03.23.2021]. URL: https://mon.gov.ua/storage/app/media/pto/standarty/2021/03/25/Standart%20na%20hrupu%20profesiy_Vykladachi%20zakladiv%20vyshchoyi%20osvity_25.03.pdf (in Ukrainian).
9. *Upravlinnia pidhotovkoiu vykladachiv profesiinoi osvity u krainakh YeS : zahalnyi ohliad* [Management of the training of vocational education teachers in EU countries : a general overview]. 2020. URL: <http://surl.li/bxkap> (in Ukrainian).
10. Yevsieieva H.P. and Lysenko H.I. *Teoriia i metodyka vykladannia v suchasni vyshchii shkoli* [Theory and methods of teaching in modern higher education]. Dnipro, 2020, 154 p. (in Ukrainian).
11. Lysenko G. Features of training of vocational education teachers in Germany. *ScienceRise : Pedagogical Education*. 2022, no. 3 (48), pp. 37–43. URL: <https://doi.org/10.15587/2519-4984.2022.257349>
12. Yevseieva G., Lysenko G. and Volkova S. Laboratory of Pedagogical Skills of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture : On the Way from Traditional Methods to Modern Educational Online Technologies. *Proceedings of the 37th International Business Information Management Association (IBIMA)*. Cordoba, Spain, 30–31 May 2021, pp. 10662–10667.

Надійшла до редакції: 19.02.2025

УДК 69.059.6

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.95.1148

РОЗУМНИЙ ДЕМОНТАЖ : РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВИБОРУ СЦЕНАРІЇВ ДЕМОНТАЖУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ОБ'ЄКТІВ АНАЛОГІВ

НАУМОВ В. О.^{1*}, доктор філософії,
БІЛОКОНЬ А. І.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 (066) 380-94-39, e-mail: naumov.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0355-6472

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 (056) 756-34-76, e-mail: belokon0604@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7332-1177

Анотація. В сучасному світі актуальність демонтажу та знесення об'єктів у будівництві визначається рядом факторів, які вимагають ефективних та інноваційних рішень у галузі управління будівельними процесами та ресурсами. Старіння будівельного фонду, зведеного ще у 60х–70х роках минулого століття, призводить до необхідності ретельного вивчення та розробки оптимальних стратегій демонтажу. Такі будівлі, які фізично та морально вичерпали свій ресурс, належать до об'єктів, які вимагають особливої уваги через потенційні ризики які вони можуть спричинити. З зростанням ступеня старіння таких будівель, а це має повсюдний характер, збільшується ймовірність виникнення дефектів та несправностей. Заходи з демонтажу та знесення важливі для мінімізації можливих негативних наслідків та забезпечення безпеки людей та впливу на економіку держави загалом. Крім того, Українське суспільство стикається із визначальними викликами, такими як бойові дії та постійні нападки країни агресорки, це призводить до значного руйнування будівель та споруд. Окрім всього, така ситуація ставить перед нами завдання пошуку методів для швидкого та безпечного демонтажу об'єктів із збереженням цінних ресурсів та навколишнього середовища для можливості подальшого стрімкого відродження. Розглядаючи демонтаж не лише як необхідну процедуру, але й як засіб досягнення стійкості у будівельній галузі, стає очевидною потреба в інтеграції інноваційних технологій і програмного забезпечення. Такі інструменти дозволяють не тільки оптимізувати процеси демонтажу, але й сприяють ретельному плануванню та використанню найбільш ефективних методів знесення, що знижує загальний вплив на навколишнє середовище та підвищує рівень безпеки. Впровадження даної програми у практику будівельної галузі має потенціал не тільки радикально змінити підхід до демонтажу застарілих або пошкоджених будівель, але й стати кроком до створення більш сталого та відповідального будівельного сектору. Цей інструмент дозволяє враховувати всі важливі аспекти, від технічних характеристик об'єкта до екологічних та соціальних вимог, пропонуючи комплексне рішення для викликів сучасності. З огляду на це, подальше дослідження та розвиток програми можуть значно сприяти прогресу в області демонтажу та реконструкції, відкриваючи нові можливості для підвищення ефективності, безпеки та стійкості у будівельній індустрії. У цьому контексті важливим є впровадження інтелектуальних технологій та програмного забезпечення для оптимального вибору сценаріїв демонтажу. Стаття спрямована на розгляд та розробку програми, яка забезпечить швидкий та ефективний вибір найбільш адаптованих стратегій демонтажу в умовах руйнування та старіння будівельного фонду, що відповідає потребам сучасного будівництва та реконструкції. **Мета дослідження** полягає у розробці та представленні алгоритму та інструментарію для інтелектуального вибору оптимальних сценаріїв демонтажу будівель та споруд на основі аналізу об'єктів та їхніх аналогів. **Предметом дослідження** є розробка та вдосконалення програмного забезпечення для інтелектуального вибору оптимальних сценаріїв демонтажу в будівництві. **Об'єктом дослідження** є процес демонтажу будівель та споруд, що застаріли та пошкоджені внаслідок бойових дій.

Ключові слова: демонтаж; знесення будівель; інноваційні технології; управління будівельними процесами; оптимізація ресурсів; старіння інфраструктури; безпека будівель; програмне забезпечення для демонтажу; відновлення після руйнувань; стійкість у будівництві

SMART DISMANTLING : DEVELOPING SOFTWARE FOR OPTIMAL SELECTION OF DISMANTLING SCENARIOS BASED ON ANALYSIS OF ANALOGOUS OBJECTS

NAUMOV V.O.^{1*}, *PhD*,
BILOKON A.I.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

^{1*} Department of Construction 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 (066) 380-94-39, e-mail: naumov.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0355-6472

² Department of Construction Production Technology, 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 (056) 756-34-76, e-mail: belokon0604@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7332-1177

Abstract. In the contemporary world, the relevance of dismantling and demolition of construction objects is determined by a range of factors that require efficient and innovative solutions in the field of construction process and resource management. The aging of the construction stock, built in the 1960s–1970s, necessitates a thorough examination and development of optimal demolition strategies. Such buildings, having physically and morally exhausted their resource, belong to objects that require special attention due to potential risks they may pose. With the aging of such buildings becoming a widespread phenomenon, the likelihood of defects and malfunctions increases. Demolition and dismantling measures are crucial for minimizing potential adverse effects and ensuring the safety of people and the impact on the national economy as a whole. Furthermore, Ukrainian society faces defining challenges such as military actions and constant attacks by the aggressor country, leading to significant destruction of buildings and structures. Moreover, this situation presents us with the task of finding methods for rapid and safe demolition of objects while preserving valuable resources and the environment for possible swift revival. Considering demolition not only as a necessary procedure but also as a means to achieve sustainability in the construction industry, the need for integration of innovative technologies and software becomes evident. Such tools not only optimize demolition processes but also facilitate careful planning and the use of the most effective demolition methods, reducing the overall impact on the environment and enhancing safety levels. The implementation of this program in the construction industry practice has the potential not only to radically change the approach to the demolition of outdated or damaged buildings but also to be a step towards creating a more sustainable and responsible construction sector. This tool allows considering all important aspects, from the technical characteristics of the object to ecological and social requirements, offering a comprehensive solution to contemporary challenges. In this regard, further research and development of the program could significantly contribute to progress in the field of demolition and reconstruction, opening new opportunities for enhancing efficiency, safety, and sustainability in the construction industry. In this context, the implementation of intelligent technologies and software for the optimal choice of demolition scenarios is crucial. The article aims to discuss and develop a program that will provide a quick and efficient selection of the most adapted demolition strategies in the conditions of destruction and aging of the construction stock, meeting the needs of modern construction and reconstruction. **The research goal** is to develop and present an algorithm and toolkit for intelligent selection of optimal demolition scenarios for buildings and structures based on the analysis of objects and their analogs. **The research subject** is the development and improvement of software for intelligent selection of optimal demolition scenarios in construction. **The research object** is the process of demolishing buildings and structures that are outdated and damaged due to military actions.

Keywords: *demolition; building dismantling; innovative technologies; construction process management; resource optimization; infrastructure aging; building safety; software for demolition; post-conflict reconstruction; sustainability in construction*

Аналіз літератури. Останні наукові дослідження в сфері демонтажу будівель та споруд свідчать про зростаючий інтерес до впровадження автоматизації та типізації виконання проєктів у цій галузі. Декілька наукових робіт відображають цей тренд.

Так статті [1] та [5] зосереджені на використанні комп'ютерних симуляцій для планування та виконання процесів демонтажу. Стаття [1] фокусується на застосуванні ANSYS для симуляції демонтажу, тоді як [5] розглядає використання 4D симуляцій для підвищення

ефективності демонтажу. Обидва дослідження підкреслюють значення візуалізації та детального планування в процесі демонтажу. Тоді як [2] та [6] описують цифровий підхід до методології управління відходами та автоматизації на будівельному майданчику. Дослідження [2] розглядає управління відходами в пост-катастрофічних районах, тоді як [6] пропонує рамкову структуру для комп'ютеризації процесів на майданчику виконання робіт. Ці статті вказують на потенціал цифрових технологій у

поліпшенні ефективності процесів демонтажу та управління відходами. В доповнення теми управління відходами статті [3] та [9] об'єднані спільною темою оцінки обсягу відходів та екологічних аспектів у демонтажі. Стаття [3] представлена модель для оцінки обсягу відходів, в той час як [8] пропонує модель оцінки життєвого циклу для кінцевих сценаріїв будівельного демонтажу. Ці дослідження демонструють важливість інтеграції екологічних аспектів та рециклінгу у процеси демонтажу. Стаття [4] в свою зосереджується на впровадженні концепції «lean demolition» (стрункого демонтажу) для муніципальних будівель, використовуючи методику часткових найменших квадратів, що підкреслює потребу в ефективніших та економічно вигідних підходах до демонтажу будівель, звертаючи увагу на важливість оптимізації процесів, зменшення відходів та підвищення ефективності ресурсовикористань. В дослідженні [7] представляє систематичний огляд ключових факторів, що впливають на деконструктивність будівель. У ній розглядається ряд параметрів, таких як дизайн, використання матеріалів, конструктивні методики, та екологічні аспекти. Ця робота має на меті розробку концептуальної моделі для покращення планування та виконання процесів демонтажу. Важливим аспектом є інтеграція цих факторів на ранніх етапах проектування, що може сприяти більш ефективній деконструкції та переробці матеріалів, зменшуючи витрати та негативний вплив на довкілля.

У сучасних реаліях стрімкого технологічного прогресу, інтеграція інноваційних технологій у будівельні процеси відкриває нові горизонти для покращення ефективності та зменшення впливу на довкілля. Особливо це стає актуальним у контексті демонтажних робіт, де потреба у точному плануванні та врахуванні безлічі факторів вимагає використання передових технічних рішень. Дослідження, представлені у статтях [9] та [10], яскраво демонструють, як сучасні

технології, зокрема BIM та системи автоматизованого виявлення елементів будівлі, можуть радикально трансформувати процеси демонтажу. Ці технології не тільки сприяють підвищенню точності та ефективності планування, але й забезпечують більшу безпеку, зменшуючи ризики, пов'язані з фізичними аспектами демонтажу. Впровадження BIM та інших автоматизованих систем дозволяє здійснити крок вперед до створення більш сталого та відповідального підходу до демонтажу будівель, що є невід'ємною частиною сучасної будівельної індустрії. В цьому аспекті важливим стає це в контексті зростаючих вимог до ефективності та сталості у будівельній галузі. Стаття [11], вносить значний вклад у цю важливу область. Автори фокусуються на розробці методик оцінки та мінімізації ризиків, пов'язаних з демонтажними роботами, підкреслюючи важливість системного підходу до управління ризиками. Це дослідження не тільки сприяє зростанню безпечності на будівельних майданчиках, але й вказує на необхідність інтеграції ризик-менеджменту в загальну стратегію планування та виконання демонтажу. Подібні дослідження відіграють критичну роль у розвитку безпечніших та більш відповідальних практик у будівництві, що є ключовим для забезпечення стійкого розвитку галузі.

У сукупності ці дослідження відображають різні аспекти та підходи до автоматизації процесів демонтажу, від використання комп'ютерних симуляцій та BIM-технологій до оптимізації управління відходами та зменшення екологічного впливу. Це дозволяє сформулювати комплексний погляд на потенціал та необхідність автоматизації у сфері демонтажних.

Вступ. У сучасному світі будівництва, постійно зростає важливість ефективного та обдуманого підходу до процесів демонтажу будівель та споруд. З огляду на це, актуальним стає розробка інноваційних рішень, які б забезпечували оптимальний вибір сценаріїв демонтажу, заснованих на

глибокому аналізу та врахуванні досвіду, накопиченого при реалізації попередніх проектів. В наших опублікованих напрацюваннях виконано аналіз технічних рішень у проектах знесення будівель та споруд з визначенням параметрів за частотою використання та важливістю [12], а також запропоновано систематизацію та типізацію цих проектних рішень, дозволяючи глибше зрозуміти та структурувати різноманіття підходів та методики в області демонтажу [13]. Ці дослідження, в комплексі дають фундаментальні уявлення про поточний стан та можливості в галузі демонтажу будівель. Це дозволяє не тільки глибше аналізувати існуючі методики, але й відкриває шлях для розробки нових, більш ефективних та безпечних технічних рішень, адаптованих до сучасних вимог та стандартів.

Данна стаття представляє новаторську систему, що використовує методику аналізу об'єктів-аналогів для визначення найбільш ефективних та безпечних способів демонтажу. В дослідженні представлено алгоритм, який дозволяє інженерам аналізувати різні варіанти демонтажу, враховуючи унікальні характеристики кожної будівлі чи споруди. Цей підхід дозволяє не тільки забезпечити ефективність та економічну вигоду процесів демонтажу, але й сприяє зниженню впливу на довкілля та підвищенню рівня безпеки працівників. Використання програмного забезпечення для підбору технології демонтажу відкриває нові можливості для оптимізації та типізації процесів у будівельній галузі, забезпечуючи ефективне використання ресурсів та врахування усіх необхідних факторів.

Викладення результатів дослідження. У центрі розробки нашого програмного забезпечення лежить інноваційний підхід до автоматизації процесу планування демонтажу будівель та споруд. Програма, написана на мові Python, реалізує сучасні принципи обробки та аналізу даних, інтегруючи в себе чотири основні блоки, що послідовно взаємодіють один з одним. Програма, розроблена для підбору методів

демонтажу будівель та споруд, носить концептуальну назву **«DemoTeka»**. Ця назва вибрана не випадково, адже вона відображає два ключові аспекти програми:

«Demo»: ця частина назви безпосередньо вказує на "демонтажний процес", основний фокус програми. Вона підкреслює специфіку програми як інструменту, призначеного для планування та виконання демонтажних робіт.

«Teka»: це слово викликає асоціації з «бібліотекою» або «колекцією», що символізує об'ємну базу знань та напрацювань, які програма використовує для своєї роботи. Це відсилає до багатолітніх досліджень та практичного досвіду в індустрії демонтажу, які лежать в основі функціональності даної програми.

«DemoTeka» об'єднує в собі інноваційні технології та перевірені часом методики, надаючи фахівцям в галузі демонтажу потужний інструмент для ефективного вибору найбільш підходящих методів роботи. Програма враховує різноманітні аспекти кожного конкретного об'єкта, від геометричних параметрів до специфіки місцезнаходження, використовуючи це для рекомендації оптимального підходу до демонтажу.

Таким чином, «DemoTeka» служить не лише як інструмент для планування конкретних демонтажних операцій, але й як цінне джерело знань, засноване на багаторічній практиці та дослідженнях в цій галузі.

Ключові етапи роботи програми включають: перший блок програми представляє собою інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, орієнтований на зручність користувача. Цей блок слугує як вхідний ворота для збору даних, які вносяться користувачем. Головне вікно інтерфейсу містить три вкладки, кожна з яких призначена для введення конкретного типу інформації. Перша вкладка призначена для введення геометричних параметрів будівлі, дозволяючи користувачу детально описати розміри та форму об'єкта. Друга вкладка зосереджена на типах конструкцій, які використовуються в будівлі, надаючи

можливість класифікувати матеріали та конструктивні елементи. Третя вкладка дозволяє вносити дані про параметри майданчика, такі як доступність, розташування та інші логістичні особливості.

Всі введені дані записуються у форматі JSON, що забезпечує легкість їх подальшої обробки та аналізу. Застосування JSON як формату зберігання даних вибрано через його гнучкість, легкість читання та

інтеграцію з різними мовами програмування, зокрема Python.

Кожен наступний блок програми розроблено таким чином, щоб використовувати вихідні дані попереднього блоку, що забезпечує послідовність та інтеграцію всього процесу аналізу. Це дозволяє формувати всеосяжний та точний аналіз для вибору найоптимальніших сценаріїв демонтажу, базуючись на специфіці конкретного об'єкта та умов майданчика.

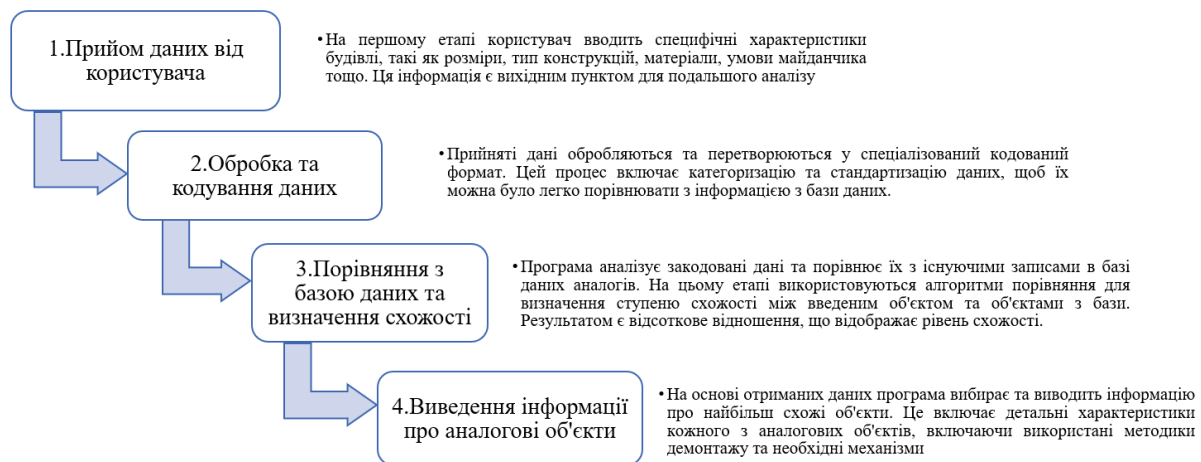


Рис. 1. Блок-схема структури програми

У процесі розробки програми для підбору методів демонтажу будівель та споруд ми зосередилися на створенні зручного та інтуїтивно зрозумілого графічного інтерфейсу користувача. Ось ключові етапи, на яких ми зупинилися:

Блок № 1. Створення вкладок для організації інформації: на етапі планування ми визначили, що ефективне управління даними є ключовим для успішного аналізу методів демонтажу. Тому було вирішено розбити інформацію на логічні секції або категорії, які можна було б легко організувати за допомогою вкладок. При розробці розроблено структуру вкладок у головному вікні програми, використовуючи елемент управління **QTabWidget** з бібліотеки **PyQt5**. Кожна вкладка призначена для збору певного типу даних:

«Геометричні параметри»: Ця вкладка призначена для введення даних про фізичні розміри об'єкта демонтажу, таких як кількість поверхів, висота будівлі, форма

будівлі тощо. Такий підхід дозволяє отримати чітке уявлення про об'єкт і відповідно підбирати методи демонтажу.

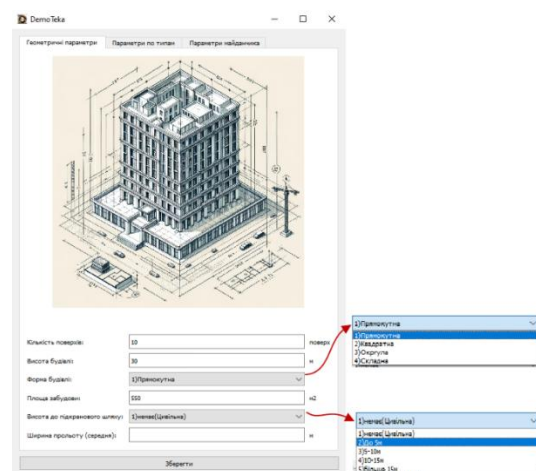


Рис. 2. Вікно першої вкладки «Геометричні параметри»

«Параметри по типам»: На цій вкладці збираються дані про тип будівлі, конструктивну схему, матеріали, із яких

вона збудована, та інші характеристики, що впливають на вибір методу демонтажу.

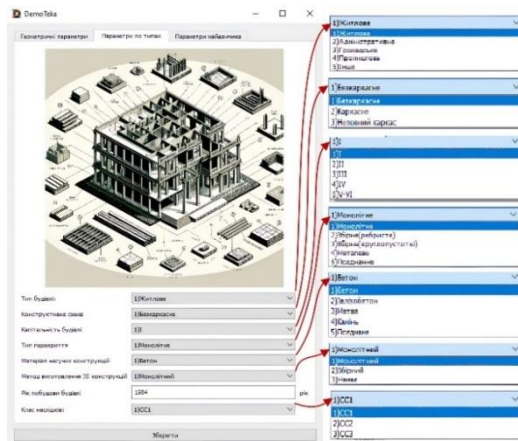


Рис. 3. Вікно другої вкладки «Параметри по типам»

«Параметри майданчика»: Тут користувачі вносять інформацію про місцезнаходження об'єкта, особливості ґрунту, відстань до важливих комунікацій тощо. Ці дані важливі для планування та безпечного виконання демонтажних робіт.

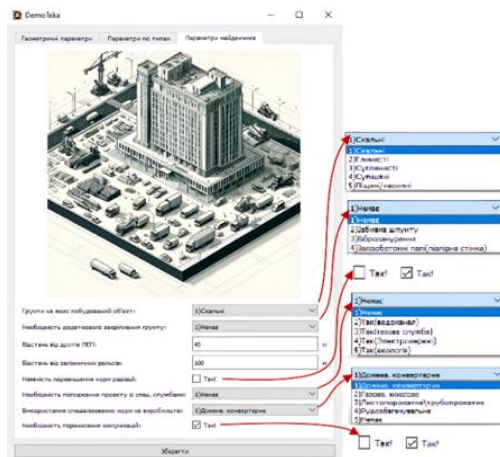


Рис. 4. Вікно третьої вкладки «Параметри майданчика»

Реалізація інтерфейсу вкладок:

Для кожної вкладки ми створили окремий клас, наслідуючи його від **QWidget**. У кожному класі визначено власний макет (**QGridLayout**), що містить різні елементи управління, як-от поля для вводу, випадаючі списки тощо, для збору специфічних даних.

Це створення розділених вкладок дозволяє користувачам програми зосередитися на конкретному аспекті демонтажу за раз, роблячи процес введення

даних більш структурованим та менш схильним до помилок.

Розміщення елементів управління: На кожній вкладці ми розмістили ряд елементів управління, таких як поля для вводу тексту, випадаючі списки та кнопки. Це дало можливість користувачам вводити та вибирати необхідні дані для аналізу.

Додавання підказок для користувачів: Для кращого розуміння призначення кожного поля ми додали короткі пояснення з мілким шрифтом під кожним елементом вводу. Це допомагає користувачам правильно заповнювати форму.

Встановлення обмежень на ті данні, що вводяться: Для забезпечення введення коректної інформації ми встановили обмеження на поля вводу, так що користувачі могли вводити лише числа та крапки, де це було необхідно.

Додавання зображень: Для візуалізації та поліпшення зовнішнього вигляду програми ми додали зображення до вкладок. Зображення розміщено над полями вводу та центровано горизонтально для кращої презентації.

```
{
  "Геометричні параметри": {
    "Кількість поверхів": "10",
    "Висота будівлі": "30",
    "Форма будівлі": "1)Прямокутна",
    "Площа забудови": "550",
    "Висота до підкранового шляху": "1)Немає(Цивільна)",
    "Ширина прольоту (середня)": ""
  },
  "Параметри по типам": {
    "Тип будівлі": "1)Житлове",
    "Конструктивна схема": "2)Каркасна",
    "Капітальність будівлі": "1)І",
    "Тип перекриття": "1)Монолітне",
    "Матеріал несучих конструкцій": "1)Бетон",
    "Метод виготовлення ЗБ конструкцій": "1)Монолітний",
    "Рік побудови": "1984",
    "Клас наслідків": "2)СС2"
  },
  "Параметри майданчика": {
    "ґрунти на яких побудований об'єкт": "3)Суглинисті",
    "Необхідність додаткового закріплення ґрунту": "1)Немає",
    "Відстань від дротів ЛЕП": "45",
    "Відстань від залізничних рельсів": "100",
    "Наявність перевищення норм радіації": "Ні",
    "Необхідність погодження проекту зі спец. службами": "1)Немає",
    "Використання спеціалізованих норм на виробництві": "5)Немає",
    "Необхідність перенесення комунікацій": "Так!"
  }
}
```

Рис. 5. Запис даних, введених з інтерфейсу

Збереження даних: Ми додали функціональність для збереження введених даних у форматі JSON, що дозволяє легко використовувати ці дані для подальшого аналізу або звітності.

Після обробки даних з інтерфейсу, отримуємо файл JSON з заповненими полями від користувача.

Після обробки запису даних в гру вступає другий блок програми, який відповідає за перетворення введених даних, зібраних на першому етапі, у числовий код, який може бути легко використаний для подальшого аналізу та порівняння з об'єктами-аналогами. Процес цього блоку може бути розглянутий як наступні етапи:

Зчитування Файлу «**parameters.json**»: Починаючи з цього блоку, програма завантажує дані з файлу «**parameters.json**», який містить вхідну інформацію, надану користувачем на попередньому етапі. Цей файл містить геометричні параметри будівлі, типи конструкцій та інші параметри, які були введені.

Закодування Значень: Програма обробляє кожен параметр, який міститься у файлі «**parameters.json**», та застосовує спеціальні правила для перетворення їх у числовий формат. Числа від 1 до 5 можуть

використовуватися для кодування певних характеристик або діапазонів значень параметрів. Форма кодування показана в таблиці.

```
{
  "Геометричні параметри": {
    "1.Кількість поверхів": 4,
    "2.Висота будівлі": 4,
    "3.Форма будівлі": 1,
    "4.Площа забудівлі": 2,
    "5.Висота до підкранового шляху": 1,
    "6.Ширина прольоту (середня)": 1
  },
  "Параметри по типам": {
    "7.Тип будівлі": 1,
    "8.Конструктивна схема": 1,
    "9.Капітальність будівлі": 1,
    "10.Тип перекриття": 1,
    "11.Матеріал несучих конструкцій": 2,
    "12.Метод виготовлення ЗБ конструкцій": 1,
    "13.Рік побудови": 4,
    "14.Клас наслідків": 3
  },
  "Параметри майданчика": {
    "15.Грунти на яких побудований об'єкт": 3,
    "16.Необхідність додаткового закріплення ґрунту": 1,
    "17.Відстань від дотів ЛЕП": 5,
    "18.Відстань від залізничних рельсів": 5,
    "19.Наявність перевищення норм радіації": 1,
    "20.Необхідність погодження проекту зі спец. службами": 1,
    "21.Використання спеціалізованих норм на виробництві": 5,
    "22.Необхідність перенесення комунікацій": 2
  }
}
```

Рис. 6. Кодування даних для подальшої обробки

Таблиця 1

Приклад таблиці форми для кодування кожного параметру

Параметр:	Код значення параметру				
	1	2	3	4	5
1. Кількість поверхів (поверх)	1–2	3–5	6–9	9–14	більше 15
2. Висота будівлі (м)	до 10	10–15	15–30	30–60	більше 60
3. Форма будівлі	1) Прямокутна	2) Квадратна	3) Округла	4) Складна	
...	...	...	...	...	...
20. Необхідність погодження проекту зі спец. службами	1) Немає	2) Так (водо-канал)	3) Так (газова служба)	4) Так (Електромережі)	5) Так (екологія)
21. Використання спеціалізованих норм на виробництві	Металургійна промисловість (Доменне, конвертерне)	Газове-, квасоляне-господарство	Листопрокатне виробництво	Збагачувальне виробництво	Немає
22. Необхідність перенесення комунікацій	Ні	Так			

Так в прикладі показана будівля 10-ти поверхів це відповідає кодуванню 4, висота будівлі 30 м – це 4, форма будівлі – прямокутна – 1, Матеріал несучих конструкцій – залізобетон, що відповідає 2, ґрунти на яких побудований об'єкт це суглинки, що відповідає 3, Необхідності погодження проекту з спецслужбами немає тому – 1.

Створення Кодованого JSON: Після закодування всіх параметрів програма створює новий JSON файл, в якому всі введені значення замінюються на відповідні числові коди. Цей новий файл містить закодовану інформацію, яка є менш об'ємною та готовою до подальшого використання.

Збереження Кодованого JSON: Оновлений JSON файл, який містить числові коди параметрів, зберігається у системі, щоб бути доступним для використання наступними блоками програми.

Цей блок є важливим кроком у підготовці даних для подальшого аналізу та порівняння з об'єктами-аналогами. Він дозволяє зберегти введені дані у більш зручному та числовому форматі, що полегшує їх подальше використання в аналізі та прийнятті рішень щодо демонтажу будівель та споруд.

Кінцевий код об'єкту виглядає наступним чином:

New_object_1 = [4, 4, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 4, 3, 3, 1, 5, 5, 1, 1, 1, 5, 2].

Дані передаються до третього блоку програми. Блок приймає цей список з 22 параметрів. Кожен параметр вже закодований числовим значенням в діапазоні від 1 до 5, що відображає певні характеристики об'єкта демонтажу. Для введення та зберігання цих даних використані стандартні засоби Python, зокрема функції **input()/open()** та структура даних **[list]**.

Об'єкти	Параметри	1. Геометричні параметри					2. Параметри по типу					3. Параметри наближення											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	м. Дніпро ТЦ Кубомир	2	2	1	1	1	3	2	5	2	4	3	1	5	1								
2	м. Дніпро будинок вул. Гавриленко	4	4	1	1	1	1	2	2	2	2	4	5	2									
3	м. Жовті води, ТПУ (частина)	2	2	1	1	2	3	4	2	4	4	5	5	1									
4	м. Рубіжне, будинок (частина)	3	3	1	1	1	1	2	2	3	4	5	1										
5	м. Дніпро вул. Херсонська	2	2	1	1	1	1	2	2	4	4	5	2										
6	м. Дніпро ТЦ Славутич (частина)	2	3	1	1	3	2	3	2	3	4	5	1										
7	м. Камишівська Школа	2	2	1	1	2	1	3	2	3	4	5	1										
28	м. Маріуполь Вулиця торгівель мас. Азовська	2	4	3	1	4	2	3	3	4	5	2	2										
29	м. Маріуполь будинок мешканця цес. Азовська	1	3	4	3	4	2	2	2	3	4	5	2	2									
30	м. Маріуполь 4-й будинок Кошарний цес. Азовська	2	2	1	1	5	1	4	1	5	4	1	1										

Рис. 7. Приклад бази даних об'єктів-аналогів

База досвіду включає себе інформацію про попередні проекти демонтажу, що виконанні та проаналізовані та є фундаментальною складовою загальної системи. Ця база містить записи про понад 30 об'єктів аналогів, про їх геометричні, типізаційні параметри та параметри майданчика

Дані в ній структуровані за тим самим принципом, що і вхідні, тобто мають 22 параметри, що відображає повний спектр характеристик об'єкту та майданчика.

Взаємодія з базою даних реалізована за допомогою модуля **sqlite3** для роботи з **SQLite**, що полегшує роботу з більш складними структурами управління базами даних (СУБД). Після інтеграції даних в цей блок ключовим етапом є порівняння вхідних даних з кожним записом у базі даних. Цей процес включає ітерацію по кожному з 22 параметрів та визначення співпадінь. Обробка даних здійснюється за допомогою інструменту циклу **for** та умовних операторів **if/else/elif**, які дозволяють ефективно порівнювати значення параметрів.

На основі отриманих результатів порівняння для кожного об'єкта з бази даних розраховується відсоток співпадінь з вхідними параметрами. Відсоток визначається як відношення кількості співпадаючих параметрів до загальної кількості параметрів, що дає змогу оцінити ступінь схожості кожного з історичних проектів до поточного завдання.

Виведення результатів. Результатом роботи програми є ранжування об'єктів з бази даних за рівнем їх схожості до заданих параметрів. Використання функції **sorted()** дозволяє організувати список об'єктів у порядку зменшення відсотка співпадінь з виводом об'єктів які найбільш схожі з заданим об'єктом.

Аналоговий приклад роботи програми:

New_object_1 = [4, 4, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 4, 3, 3, 1, 5, 5, 1, 1, 1, 5, 2].

28.Mariupol_Spor_Torkmas = [2, 4, 2, 4, 3, 1, 4, 2, 3, 2, 1, 2, 2, 4, 3, 4, 4, 2, 2, 3, 1, 2] – 22,7 %.

2.Dnipro_Bud_Gavr = [4, 4, 1, 5, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 4, 3, 3, 1, 5, 5, 1, 1, 1, 5, 2] – 95,5 %.

Тобто об'єкт **2, м. Дніпро, будинок вул. Гавриленко** сходиться з нашим введеним об'єктом на 95,5 %, що з високою ефективністю можна обирати методи, що

були використані при демонтажі цього об'єкту.

У наступному заключному блоці програмного забезпечення для демонтажу будівель та споруд реалізується функціонал пошуку та надання користувачу технічної документації для обраного об'єкта-аналога. Цей блок призначений для автоматизації доступу до відповідних технологічних схем і технологічних карт, що дозволяє інженерам та проектувальникам швидко отримати необхідну інформацію для планування робіт.

На вході цей блок приймає ідентифікатор обраного об'єкта-аналога, який є найбільш схожим на введений об'єкт на основі аналізу, проведеного попереднім блоком програми. Ідентифікація об'єкта може бути представлена у формі унікального коду або іншого ключа, що дозволяє однозначно ідентифікувати об'єкт у базі даних.

Пошук технічної документації. Цей етап включає пошук у базі даних технічної документації для обраного об'єкта-аналога. Документація може включати технологічні

схеми, технологічні карти, інструкції з демонтажу та іншу важливу інформацію. Пошук в базі даних здійснюється за допомогою SQL-запитів у системі управління базами даних (СУБД) за ідентифікатором об'єкта.

Генерація посилання на документ (данний блок ще не реалізований в фінальній версії програми, але ось посилання як він має працювати):

Після ідентифікації відповідної технічної документації програма генерує посилання на PDF-файл документа. Це посилання може бути статичним URL до файлу, збереженого на сервері, або динамічногенерованим URL, що дозволяє завантажити документ із бази даних або з хмарного сховища.

Виведення результатів. На останньому етапі програма надає користувачу посилання на PDF-файл технічної документації. Це посилання може бути представлене у вигляді гіпертекстової вказівки у веб-інтерфейсі або ж як текстове повідомлення в консольному застосунку.

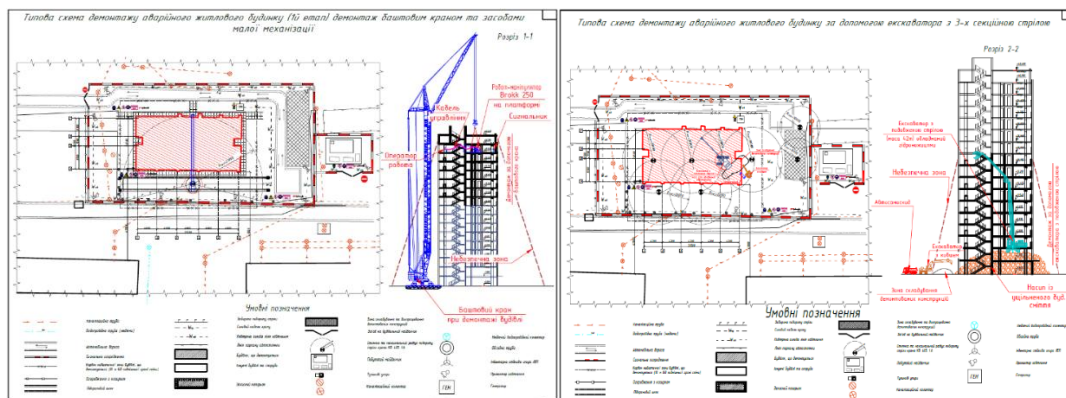


Рис. 8. Технологічна схема демонтажу 14-ти поверхового будинку (етап 1 – демонтаж баштовим краном, етап 2 – демонтаж екскаватором з подовженою стрілою)

Для взаємодії з базою даних використовується модуль `sqlite3` для виконання SQL-запитів до бази даних для пошуку документації за ідентифікатором об'єкта. Реалізація логіки для формування посилання на документ. Якщо документ буде зберігатися на сервері, можна використовувати базовий URL сервера разом з шляхом до файлу. Для динамічного генерування URL можуть бути застосовані бібліотеки, як-от **Flask** або **Django**, що

дозволяють інтегрувати веб-сервіси з Python-додатками. Виведення посилання: Використання графічного інтерфейсу для виведення посилання у вікно програми або інтеграція з веб-фреймворками для представлення посилання через веб-інтерфейс.

Цей блок програмного забезпечення спрощує доступ до технічної документації для об'єктів-аналогів, що значно прискорює процес підготовки до демонтажних робіт.

Автоматизація пошуку та надання документації забезпечує ефективність планування та дозволяє інженерам та проєктантам зосередитися на ключових аспектах демонтажу, оптимізуючи використання ресурсів і часу.

Висновки

У розробленій програмі для аналізу та планування демонтажу будівель та споруд інтегровано чотири ключові блоки, кожен з яких виконує свої специфічні функції, спрямовані на оптимізацію процесу підготовки та виконання демонтажних робіт.

Перший блок, який представляє собою графічний інтерфейс, значно спрощує процес введення даних, роблячи програму зручною та доступною для користувачів з різним рівнем технічної підготовки. Другий блок призначений для кодування введених даних у формат, оптимізований для подальшої обробки, що забезпечує високу швидкість та точність аналізу. Третій блок виконує комплексний аналіз введених даних, порівнюючи їх з інформацією про аналогічні об'єкти у базі даних, що дозволяє визначити найбільш підходящі методики та технології для планованого демонтажу. Нарешті, четвертий блок забезпечує інтерпретацію результатів аналізу, надаючи

користувачам детальну інформацію про використані технології та технічні схеми обраних аналогів у форматі PDF.

Застосування цієї програми може бути особливо корисним на етапах тендеру або переговорів, оскільки вона дозволяє замовникам ефективно перевіряти інформацію, надану підрядниками, а також надає підрядникам обґрунтовані аргументи на підтримку необхідності використання конкретних технологій, обладнання та механізмів. Таким чином, програма сприяє підвищенню прозорості та відповідальності у процесі підготовки та виконання демонтажних робіт, забезпечуючи об'єктивність вибору методів та зниження потенційних ризиків.

У майбутньому планується розширення функціоналу програми для аналізу економічного ефекту від демонтажу будівель та споруд, що дозволить не лише оптимізувати використання технічних ресурсів, але й ефективно управляти витратами та досягати максимальної економії при плануванні та реалізації демонтажних проєктів. Такий підхід відкриває нові перспективи для підвищення ефективності управління проєктами демонтажу, сприяючи сталому розвитку у цій сфері.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rajan S. P., Das A. Simulation of Building Demolition using ANSYS. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. № 6 (6). Pp. 452–457. DOI: 10.22214/IJRASET.2018.6070.
2. Cocco P. L., Ruggiero R. From rubbles to digital material bank. *A digital methodology for construction and demolition waste management in post-disaster areas*. ERT. 2023. Vol. 6, № 2. DOI: 10.35208/ert.1290843.
3. Gi-Wook C., Won-Hwa H., Se-Hyu C., Young-Chan K. Developing an Optimal Ensemble Model to Estimate Building Demolition Waste Generation Rate. *Sustainability*. № 15 (13). DOI: 10.3390/su151310163.
4. Hamid R., Vosoughifar S., Somayeh F., Hosseini S. Z. Implementing the lean demolition of municipality buildings using fuzzy partial least squares technique. *Journal of Facilities Management*. 2022. DOI: 10.1108/jfm-10-2021-0120.
5. Kunieda Y., Codinhoto R., Emmitt S. Increasing the efficiency and efficacy of demolition through computerised 4D simulation. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2019. № 26 (10). DOI: 10.1108/ECAM-11-2018-0492.
6. Amici C., Rotilio M., Berardinis P.D., Cucchiella F. Framework for Computerizing the Processes of a Job and Automating the Operational Management on Site – A Case Study of Demolition and Reconstruction Construction Site. *Buildings*. 2022. № 12 (6). P. 800. DOI: 10.3390/buildings12060800.
7. Balogun H., Alaka H., Egwim C. N., Ajayi S. Systematic review of drivers influencing building deconstructability : Towards a construct-based conceptual framework. *Waste Management & Research*. 2023. № 41 (3). DOI: 10.1177/0734242X221124078.
8. Quéheille E., Ventura A., Saiyouri N., Taillandier F. A Life Cycle Assessment model of End-of-life scenarios for building deconstruction and waste management. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 339. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130694.

9. Janani S. E., Renuka S. M., Umarani C. Quantification of the deconstruction potential of buildings with innovative connections using BIM based DAS (Deconstructability Assessment Score) tool. *Materials Today : Proceedings*. 2022. Vol. 65, part 2. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.05.209.
10. Gordon M., Batallé A., De Wolf C., Sollazzo A., Dubor A., Wang T. Automating building element detection for deconstruction planning and material reuse : A case study. *Automation in Construction*. 2023. Vol. 146. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104697.
11. Patel D. J., Patel D. A., Patel S. Assessment of the Environmental Pollutants of Demolition Sites for Developing Real-Time Monitoring Indexes : An Empirical Analysis. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*. 2024. № 16. DOI: 10.1061/jladah.ladr-931.
12. Білоконь А. І., Несеоря П. І., Наумов В. О. Аналіз основних технічних рішень у проєктах знесення будівель та споруд. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 3. DOI: 10.30838/j.bpsacea.2312.050722.15.860.
13. Білоконь А. І., Несеоря П. І., Наумов В. О. Систематизація і типізація проєктних рішень знесення та демонтажу будівель і споруд. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2022. № 4. DOI: 10.30838/j.pmhtml.2413.271222.18.907.

REFERENCES

1. Rajan S.P. and Das A. Simulation of Building Demolition using ANSYS. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology* No. 6 (6), pp. 452–457. DOI: 10.22214/IJRASET.2018.6070.
2. Cocco P.L. and Ruggiero R. From rubbles to digital material bank. A digital methodology for construction and demolition waste management in post-disaster areas. *ERT*. 2023, vol. 6, no. 2. DOI: 10.35208/ert.1290843.
3. Gi-Wook C., Won-Hwa H., Se-Hyu C. and Young-Chan K. Developing an Optimal Ensemble Model to Estimate Building Demolition Waste Generation Rate. *Sustainability*. No. 15 (13). DOI: 10.3390/su151310163.
4. Hamid R., Vosoughifar S., Somayeh F. and Hosseini S.Z. Implementing the lean demolition of municipality buildings using fuzzy partial least squares technique. *Journal of Facilities Management*. 2022. DOI: 10.1108/jfm-10-2021-0120.
5. Kunieda Y., Codinhoto R. and Emmitt S. Increasing the efficiency and efficacy of demolition through computerised 4D simulation. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2019, no. 26 (10). DOI: 10.1108/ECAM-11-2018-0492.
6. Amici C., Rotilio M., Berardinis P.D. and Cucchiella F. Framework for Computerizing the Processes of a Job and Automating the Operational Management on Site – A Case Study of Demolition and Reconstruction Construction Site. *Buildings*. 2022, no. 12 (6), pp. 800. DOI: 10.3390/buildings12060800.
7. Balogun H., Alaka H., Egwim C.N. and Ajayi S. Systematic review of drivers influencing building deconstructability : Towards a construct-based conceptual framework. *Waste Management & Research*. 2023, no. 41 (3). DOI: 10.1177/0734242X221124078.
8. Quéheille E., Ventura A., Saiyouri N. and Taillandier F. A Life Cycle Assessment model of End-of-life scenarios for building deconstruction and waste management. *Journal of Cleaner Production*. 2022, vol. 339. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130694.
9. Janani S.E., Renuka S.M. and Umarani C. Quantification of the deconstruction potential of buildings with innovative connections using BIM based DAS (Deconstructability Assessment Score) tool. *Materials Today : Proceedings*. 2022, vol. 65, part 2. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.05.209.
10. Gordon M., Batallé A., De Wolf C., Sollazzo A., Dubor A. and Wang T. Automating building element detection for deconstruction planning and material reuse : A case study. *Automation in Construction*. 2023, vol. 146. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104697.
11. Patel D.J., Patel D.A. and Patel S. Assessment of the Environmental Pollutants of Demolition Sites for Developing Real-Time Monitoring Indexes : An Empirical Analysis. *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*. 2024, no. 16. DOI: 10.1061/jladah.ladr-931.
12. Bilokon A.I., Nesevria P.I. and Naumov V.O. *Analiz osnovnykh tekhnichnykh rishen u proektakh znesennia budivel ta sporud* [Analysis of the main technical solutions in the demolition projects of buildings and structures]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2022, no. 3. DOI: 10.30838/j.bpsacea.2312.050722.15.860. (in Ukrainian).
13. Bilokon A.I., Nesevria P.I. and Naumov V.O. *Systematyzatsiia i typizatsiia proektnykh rishen znesennia ta demontazhu budivel i sporud* [Systematization and typification of design solutions for the demolition and dismantling of buildings and structures]. *Metaloznastvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2022, no. 4. DOI: 10.30838/j.pmhtml.2413.271222.18.907. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 01.03.2025.

УДК 69.059.7

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.106.1149

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ

ОЛЬХОВИК С. М.^{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) 431-94-24, e-mail: serge.olkhovyk@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-8578-1579

² Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 628-77-77, e-mail: sokolov.igor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8366-4301

Анотація. Постановка проблеми. В Україні та багатьох країнах Європи значна частина житлового фонду застаріла та не відповідає сучасним вимогам комфорту, енергоефективності та безпеки. Особливо актуальною ця проблема є для України, де значна частина житлових будівель була пошкоджена або зруйнована внаслідок воєнних дій. Реконструкція житлових будівель стає важливим інструментом оновлення житлового фонду, який дозволяє уникнути значних фінансових витрат, характерних для нового будівництва. **Мета дослідження.** Метою дослідження є огляд методик оцінки ефективності реконструкції житлових будівель з урахуванням сучасних підходів, які включають економічні, соціальні та екологічні аспекти. У дослідженні акцентується на необхідності врахування принципів сталого розвитку та інтеграції комплексних підходів до оцінки реконструкції. **Висновки.** У статті показано, що ефективність реконструкції житлових будівель повинна оцінюватися з урахуванням широкого спектра факторів, які виходять за межі суто економічних критеріїв. Інтеграція соціальних, екологічних та технічних аспектів в оцінку дозволяє забезпечити збалансований розвиток міського житлового середовища. Такі підходи сприяють досягненню довгострокової ефективності реконструкції, знижуючи її вплив на мешканців та міське середовище.

Ключові слова: реконструкція житлових будівель; ефективність реконструкції; сталий розвиток; методики оцінки; соціальні аспекти; економічні аспекти; екологічні аспекти; міське середовище

MODERN APPROACHES TO EVALUATING THE EFFICIENCY OF RESIDENTIAL BUILDING RECONSTRUCTION

OLKHOVYK S.M.^{1*}, Postgrad. Stud.,

SOKOLOV I.A.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.

^{1*} Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 431-94-24, e-mail: serge.olkhovyk@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-8578-1579

² Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 628-77-77, e-mail: sokolov.igor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8366-4301

Abstract. Problem statement. This paper reviews methods for assessing the efficiency of residential building reconstruction in Ukraine and Europe. Many existing buildings are outdated or damaged, and their rehabilitation is essential for ensuring safety, energy efficiency, and improved living conditions. In Ukraine, a large portion of the housing stock no longer meets modern standards of comfort, energy efficiency, or safety – an issue intensified by damages resulting from the aggression of the Russian Federation. Traditional assessment methods tend to focus solely on economic factors, such as investment costs and operational savings, while often overlooking the social and environmental impacts of reconstruction. This narrow focus can lead to outcomes that fail to improve overall urban living conditions. By integrating economic, social, and environmental criteria, the study provides a balanced evaluation framework that supports sustainable urban development. **The purpose of the study.** The objective of this study is to review various methodologies for evaluating the efficiency of residential building reconstruction. The research expands the concept of reconstruction to include renovation, retrofit, and refurbishment measures. It emphasizes the role of modern monitoring technologies, such as Internet of Things (IoT) devices, which provide real-time data on factors like noise, vibration, and air quality. Such an approach enables timely adjustments that reduce negative effects on residents

and the environment, ensuring that reconstruction projects are both economically sound and socially responsible. **Conclusions.** The findings demonstrate that a comprehensive evaluation framework – one that integrates economic, social, and environmental aspects – is essential for effective residential building reconstruction. By balancing cost efficiency with improvements in quality of life and ecological protection, reconstruction projects can significantly enhance urban resilience and sustainability. This holistic approach ultimately contributes to safer, healthier, and more vibrant urban communities.

Keywords: *residential building reconstruction; reconstruction efficiency; sustainable development; evaluation methodologies; social aspects; economic aspects; environmental aspects; urban environment*

Постановка проблеми. У сучасному світі питання реконструкції житлових будівель виходить на передній план в контексті загальноміського розвитку та оновлення інфраструктури. Міста в Україні та Європі стикаються з проблемою застарілого житлового фонду, що часто не відповідає сучасним стандартам комфорту та енергоефективності. Особливо гостро це питання постає в Україні, де значна частина житлових будівель була пошкоджена або зруйнована внаслідок повномасштабних воєнних дій. Ці будівлі становлять загрозу для мешканців, оскільки не відповідають вимогам безпеки та комфорту.

В умовах високих витрат на нове будівництво та складнощів фінансування в умовах економічної нестабільності, реконструкція стає оптимальним рішенням, яке дозволяє оновити існуючі структури з меншими інвестиціями. Це особливо актуально в контексті термінового відновлення або заміни житлового фонду для забезпечення належних умов проживання. Реконструкція житлових будівель виступає основним засобом оновлення житлового фонду, що сприяє задоволенню потреб населення в сучасному житловому середовищі.

Під терміном «реконструкція» розуміється комплекс заходів, спрямованих на корінне перевлаштування будівлі з метою її покращення, удосконалення та оновлення. Це включає технічне оновлення, елементи нового будівництва, заміну застарілих конструкцій і обладнання. Реконструкція має на меті забезпечення результативності та ефективності використання житлових будівель, покращення їх якісних параметрів і створення комфортного житлового середовища.

Аналіз досліджень та публікацій.

Питанням визначення економічної ефективності реконструкції житлових будинків присвячені праці багатьох науковців. Ці дослідження охоплюють широкий спектр аспектів, включаючи методологічні підходи, оцінку економічних показників, аналіз витрат і доходів, а також вплив на соціальну та екологічну складові.

Серед авторів, які внесли значний вклад у цю сферу, можна виділити: Кравчуновська Т. С. [1], Плешкановська А. М. [5], Сєдін В. Л. [7], Гриценко О. С. [3], Пекарчук О. П. [6], Г. Шаоцин [2] та багато інших.

Мета і завдання дослідження.

У сучасній українській літературі ефективність реконструкції житлових будівель часто оцінюється виключно на основі економічних показників. Цей підхід, хоча і важливий, не враховує інших критичних аспектів, які можуть суттєво впливати на результати реконструкції. На відміну від української практики, в зарубіжних дослідженнях широко використовуються підходи, що включають як економічні, так і соціальні та екологічні фактори. Це дозволяє отримати більш комплексну картину ефективності реконструкції та враховувати всі важливі аспекти впливу на міське середовище.

Таким чином, метою цього дослідження є огляд підходів до оцінки ефективності реконструкції житлових будівель.

Виклад матеріалу. У контексті оцінки ефективності оновлення житлових будівель важливо розуміти різницю між термінологією, що використовується в українській та англійській мовах. В українському контексті термін «реконструкція» має ширше значення, ніж англійське «reconstruction». Для точного

перекладу українського терміну «реконструкція» можна використовувати кілька англійських відповідників, зокрема «renovation», «retrofit», «refurbishment», та в деяких випадках «reconstruction». Варто зазначити, що термін «reconstruction» в англійській мові часто застосовується до відновлення будівель після значних пошкоджень внаслідок стихійних лих чи військових дій.

В українському законодавстві та будівельній практиці використовується низка термінів для опису процесів оновлення житлового фонду. Зокрема, «комплексна реконструкція житлового фонду» включає широкий спектр заходів від перебудови окремих будинків до повного перетворення території. Цей процес може включати зміни геометричних розмірів будівель, їх функціонального призначення, заміну окремих конструкцій та елементів, а також знесення застарілого житлового фонду та будівництво нового.

Інші ключові терміни в цьому контексті включають: капітальний ремонт (англ. major repairs, overhaul, refurbishment) – відновлення ресурсу будівлі з заміною конструктивних елементів та інженерних систем; модернізація (англ. modernization, upgrade, retrofit) – удосконалення будівлі відповідно до нових вимог та норм; реставрація (англ. restoration) – відновлення об'єктів культурної спадщини з збереженням їх автентичності; реновація (англ. renovation, refurbishment) – може означати як відновлення зовнішнього вигляду будівель з модернізацією внутрішнього планування, так і повне знесення старої забудови з новим будівництвом; реконструкція (англ. reconstruction, renovation, retrofit, refurbishment) – комплексний процес, що може включати зміни геометричних розмірів будівель, їх функціонального призначення, заміну окремих конструкцій та елементів [8].

Чітке розмежування цих термінів та їх відмінностей сприяє правильній оцінці ефективності проєктів оновлення житлового фонду. Кожен з цих процесів має свої

особливості, які впливають на вибір методик оцінки їх ефективності. Наприклад, оцінка ефективності реконструкції може включати аналіз зміни кількості житлових квартир та загальної площі, тоді як оцінка ефективності капітального ремонту може фокусуватися на відновленні ресурсу будівлі та покращенні її експлуатаційних показників.

В українських наукових та практичних публікаціях переважає економічний підхід до оцінки ефективності реконструкції житлового фонду [3; 4; 6]. Цей підхід базується на розрахунку та аналізі техніко-економічних показників (ТЕП) для різних варіантів реконструкції. ТЕП використовуються для порівняння конструктивних та об'ємно-планувальних рішень з метою вибору найбільш економічно доцільного варіанту. Система оцінки ґрунтується на визначенні відносної техніко-економічної ефективності реконструкції, яка відображає співвідношення між витратами та очікуваними доходами. До витрат відносяться капітальні вкладення на роботи та матеріали, додаткові витрати на тимчасове відселення жителів, поточні витрати та інше. Доходи можуть включати виручку від продажу житла, надходження від оренди та інші джерела. Такий підхід дозволяє обрати оптимальний варіант реконструкції з економічної точки зору, враховуючи баланс між інвестиціями та потенційним прибутком.

При оцінюванні ефективності реконструкції житлового фонду також проводиться порівняльний аналіз з варіантом нового будівництва. Це дозволяє визначити, чи є реконструкція більш вигідною альтернативою, ніж знесення старої будівлі та зведення нової. У такому порівнянні важливо враховувати не лише початкові витрати, але й прогнозований термін експлуатації як нового, так і реконструйованого будинку.

Варто зазначити, що з 2019 року, коли було прийнято Указ Президента України «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року», в Україні офіційно

впроваджено принципи сталого розвитку. Ці принципи передбачають, що всі процеси розвитку, включаючи реконструкцію житлового фонду, мають розглядатися не лише з економічних позицій, а й з урахуванням соціальних та екологічних аспектів. Такий комплексний підхід дозволяє оцінити ефективність реконструкції більш всебічно, враховуючи її вплив на якість життя мешканців, енергоефективність будівель, зменшення

негативного впливу на навколишнє середовище та інші фактори сталого розвитку.

Для кращого розуміння комплексного підходу до оцінки ефективності реконструкції житлового фонду, розглянемо діаграму, яка ілюструє взаємозв'язок трьох ключових аспектів сталого розвитку: економічного, екологічного та соціального (рис.) [9].

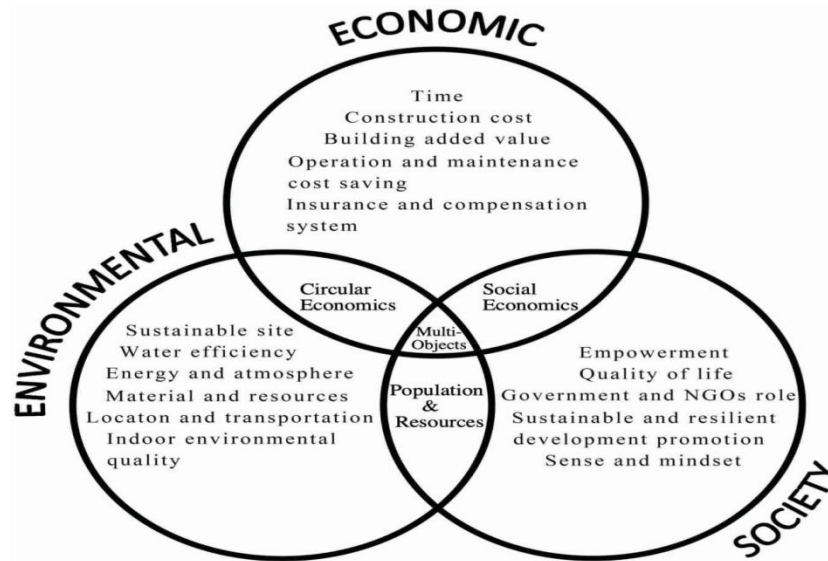


Рис. Взаємозв'язок економічних, екологічних та соціальних аспектів у контексті сталого розвитку

Ця діаграма демонструє, як різні фактори взаємодіють у рамках концепції сталого розвитку: 1) економічний аспект включає часові та фінансові показники, такі як вартість будівництва, додана вартість будівлі, економія на експлуатації та обслуговуванні; 2) екологічний аспект охоплює стійкість ділянки, ефективність використання води та енергії, якість матеріалів та ресурсів, а також вплив на навколишнє середовище; 3) соціальний аспект враховує розширення можливостей населення, якість життя, роль уряду та громадських організацій у сприянні сталому розвитку.

Важливо відзначити зони перетину цих аспектів: 1) ресурсоефективна економіка на перетині економічного та екологічного аспектів; 2) соціальна економіка на перетині економічного та соціального аспектів; 3) населення та ресурси як центральний елемент, що об'єднує всі три аспекти.

При застосуванні підходів сталого розвитку оцінка ефективності реконструкції житлового фонду значно розширюється порівняно з традиційним аналізом техніко-економічних показників (ТЕП). Тепер необхідно враховувати набагато більше факторів, які охоплюють різні аспекти сталості. Серед них: екологічна сталість, що включає енергоефективність, вибір матеріалів, управління відходами та водними ресурсами; соціальна сталість, яка передбачає доступність реновації та створення змішаних спільнот; економічна сталість з фокусом на довгострокову ефективність; технічна надійність, що враховує довговічність та адаптивність будівель. Крім того, важливим фактором стає задоволеність користувачів будівлі, що відображає комфорт проживання та відповідність очікуванням мешканців [10; 11]. Такий комплексний підхід дозволяє оцінити реальну ефективність реконструкції

не лише з точки зору економічної вигоди, але й з урахуванням її впливу на якість життя людей та навколишнє середовище.

Використання сучасних технологій, таких як Інтернет речей (IoT), відкриває нові можливості для сталого підходу до оцінки ефективності реконструкції будівель. IoT дозволяє в режимі реального часу збирати та аналізувати різноманітні параметри, які можуть негативно впливати на навколишнє середовище та людей під час реконструкції. Наприклад, як зазначено у дослідженні Фредрікссон та ін. [8], за допомогою IoT-пристроїв можна вимірювати рівень шуму від будівельного транспорту та виконання робіт, вібрацію, запиленість повітря, інтенсивність руху тощо. Це дозволяє оперативно виявляти та мінімізувати негативний вплив реконструкції на місцевий бізнес та мешканців. Зокрема, надмірний шум може суттєво зашкодити роботі розташованих поблизу кафе, ресторанів та інших закладів, що потребують комфортної атмосфери.

В українських наукових публікаціях також зустрічаються підходи, що відповідають принципам сталого розвитку, які активно використовуються в міжнародній практиці. Зокрема, вітчизняні дослідження звертають увагу на необхідність комплексного підходу до реконструкції міського середовища, де реконструкція розглядається не просто як оновлення окремих будівель, а як складова частина цілісного процесу розвитку міських територій.

Наприклад, окремі підходи в містобудівному проектуванні передбачають перехід від традиційних методів конструктивного проектування до більш сучасного наукового підходу. Цей підхід включає аналіз поточного стану міського середовища, ідентифікацію проблем та перспектив розвитку, а також розробку моделей майбутнього розвитку, які враховують соціальні, економічні та

екологічні аспекти. Така інтеграція різних видів реконструкції створює умови для ефективного функціонування міста як складної соціотехнічної системи [5].

Більш того, підкреслюється важливість дотримання критеріїв, що базуються на принципах сталого розвитку, таких як мінімізація понаднормативної доступності до центрів соціально-культурного обслуговування. Це підтверджує, що в Україні поступово формується підхід до реконструкції, орієнтований на забезпечення довгострокової сталості та гармонійного розвитку міського середовища, що відповідає міжнародним практикам сталого розвитку.

Висновки

Узагальнюючи проведений аналіз, можна стверджувати, що оцінка ефективності реконструкції житлових будівель є складним і багатограним процесом, який виходить за рамки суто економічних підходів. Врахування соціальних, екологічних та технічних аспектів є критично важливим для забезпечення сталого розвитку міського середовища. Різні методики, розроблені в Україні та за кордоном, мають свої сильні сторони та обмеження, і їх комплексне використання дозволяє досягти оптимальних результатів у реконструкції житлового фонду. Впровадження сучасних технологій, таких як IoT, відкриває нові можливості для моніторингу та управління процесом реконструкції, забезпечуючи більшу гнучкість та точність у прийнятті рішень. У перспективі важливо продовжувати інтеграцію принципів сталого розвитку в процеси реконструкції, зокрема на рівні міського планування, з метою оцінки ефективності реконструкції житлових будівель, що сприятиме підвищенню якості життя населення та збереженню екологічного балансу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кравчуновська Т. С., Дадіверіна Г. В. Аналіз методів визначення тривалості комплексної реконструкції житлової забудови. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение*. 2015. Вып. 80. С. 171–180. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmc_2015_80_30

2. Гао Ш. Ефективність реконструкції житла: концептуальні основи, сутність, критерії. *Бізнес Інформ*. 2014. № 9. С. 162–167.
3. Гриценко О. С., Вахович І. В., Боліла Н. В. Оцінка ефективності реконструкції житлових будинків. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин : зб. наук. пр.* Київ : КНУБА, 2013. Вип. 30. С. 185–191.
4. Лисиця Н. В., Гусарова Л. В. Методологічні основи оцінки економічної ефективності реконструкції житлових будівель. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2023. № 52 (2). С. 32–42.
5. Плешкановська А. М. Методи оцінки ефективності деяких видів реконструкції. *Містобудування та територіальне планування*. 2013. Вип. 50. С. 560–567. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2013_50_81
6. Пекарчук О. П. Реконструкція багатоквартирного житла з позиції економічної ефективності проектних вирішень. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія : Архітектура*. 2013. № 757. С. 117–123. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPARX_2013_757_20
7. Седін В. Л., Ковальов В. В., Кравчуновська Т. С. Розвиток методів оцінки, аналізу, обґрунтування і вибору раціональних організаційно-технологічних рішень реконструкції промислових підприємств. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. № 2. С. 49–54.
8. Fredriksson A., Sezer A. A., Angelakis V., Gundlegård D. Construction related urban disturbances: identification and linking with an IoT-model. *Autom. ConStruct.* 2022. URL: [10.1016/j.autcon.2021.104038](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104038)
9. Liao H., Ren R., Li L. Existing Building Renovation: A Review of Barriers to Economic and Environmental Benefits. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2023. Vol. 20. Pp. 4058. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph20054058>
10. Lind H., Annadotter K., Björk F., Högborg L., Af Klintberg T. Sustainable Renovation Strategy in the Swedish Million Homes Programme : A Case Study. *Sustainability*. 2016. № 8. P. 388. URL: <https://doi.org/10.3390/su8040388>
11. Sodagar B. Sustainability Potentials of Housing Refurbishment. *Buildings*. 2013. № 3. Pp. 278–299. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings3010278>

REFERENCES

1. Kravchunovska T.S. and Dadyverina H.V. *Analiz metodiv vyznachennya tryvalosti kompleksnoyi rekonstruktsiyi zhitlovoyi zabudovy* [Analysis of Methods for Determining the Duration of Complex Reconstruction of Residential Construction]. *Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2015, no. 80, pp. 171–180. (in Ukrainian).
2. Hao Sh. *Efektivnist' rekonstruktsiyi zhitla: kontseptual'ni osnovy, sutsnist', kryteriyi* [The Efficiency of Housing Reconstruction: Conceptual Foundations, Essence, and Criteria]. *Biznes Inform* [Business Inform]. 2014, no. 9, pp. 162–167. (in Ukrainian).
3. Hrytsenko O.S., Vakhovych I.V. and Bolila N.V. *Otsinka efektyvnosti rekonstruktsiyi zhitlovykh budynkiv* [Assessment of the Efficiency of Residential Building Reconstruction]. *Shlyakhy pidvyshchennya efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannya rynkovykh vidnosyn: zb. naukovykh prats* [Ways to Improve Construction Efficiency]. 2013, no. 30, pp. 185–191. (in Ukrainian).
4. Lysytsia N.V. and Husarova L.V. *Metodolohichni osnovy otsinky ekonomichnoyi efektyvnosti rekonstruktsiyi zhitlovykh budivel* [Methodological Bases for Assessing the Economic Efficiency of Residential Building Reconstruction]. *Shlyakhy pidvyshchennya efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannya rynkovykh vidnosyn* [Ways to Improve Construction Efficiency in the Conditions of Formation of Market Relations]. 2023, no. 52 (2), pp. 33–44. (in Ukrainian).
5. Pleshkanovska A.M. *Metody otsinky efektyvnosti deyakykh vydiv rekonstruktsiyi* [Methods for Assessing the Efficiency of Certain Types of Reconstruction]. *Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya* [Urban Planning and Territorial Development]. 2013, no. 50, pp. 560–567. (in Ukrainian).
6. Pekarchuk O.P. *Rekonstruktsiya bahatokvartyrnoho zhitla z pozytsiyi ekonomichnoyi efektyvnosti proektnykh vyrishen* [Reconstruction of Multi-Apartment Housing from the Perspective of the Economic Efficiency of Design Solutions]. *Visnyk Natsional'noho universytetu "Lvivs'ka polytekhnika". Seriya : Arkhitektura* [Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Series : Architecture]. 2013, no. 757, pp. 117–123. (in Ukrainian).
7. Siedin V.L., Kovalov V.V. and Kravchunovska T.S. *Rozvytok metodiv otsinky, analizu, obruntuvannya i vybory ratsional'nykh orhanizatsiyno-tekhnologichnykh rishen rekonstruktsiyi promyslovykh pidpriemstv* [Development of Methods for Assessing, Analyzing, Substantiating, and Selecting Rational Organizational and Technological Solutions for the Reconstruction of Industrial Enterprises]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2017, no. 2, pp. 49–54. (in Ukrainian).
8. Fredriksson A., Sezer A.A., Angelakis V. and Gundlegård D. Construction related urban disturbances : identification and linking with an IoT-model. *Autom. ConStruct.* 2022. URL: [10.1016/j.autcon.2021.104038](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104038)
9. Liao H., Ren R. and Li L. Existing Building Renovation : A Review of Barriers to Economic and Environmental Benefits. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2023, vol. 20, pp. 4058. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph20054058>

10. Lind H., Annadotter K., Björk F., Högberg L. and Af Klintberg T. Sustainable Renovation Strategy in the Swedish Million Homes Programme : A Case Study. Sustainability. 2016, no. 8, p. 388. URL: <https://doi.org/10.3390/su8040388>

11. Sodagar B. Sustainability Potentials of Housing Refurbishment. Buildings. 2013, no. 3, pp. 278–299. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings3010278>

Надійшла до редакції : 07.02.2025.

УДК 624.131

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.112.1150

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ЗОВНІШНЬОГО ПІДСИЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ДО ВПЛИВУ АГРЕСИВНИХ ФАКТОРІВ

ПУСТОВОЙТОВА О. М.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
ФІРСОВ П. М.², канд. техн. наук, доц.,
КАМЧАТНА С. М.³, канд. техн. наук, доц.,
ОРЕЛ Є. Ф.⁴, канд. техн. наук, доц.,
ГВОЗДЮК О. А.⁵, асп.

^{1*} Кафедра будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61000, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-31-07, e-mail: oksana_pustov@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-4774-6686

² Кафедра будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61000, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-31-07, e-mail: pavelfirsov1991@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9119-3968

³ Кафедра вищої математики та фізики, Український державний університет залізничного транспорту, площа Фейєрбаха, 7, 61001, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-19-21, e-mail: kamchatna.s.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5711-4146

⁴ Кафедра вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту, площа Фейєрбаха, 7, 61001, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-19-21, e-mail: orel_fisherman@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-6261-1558

⁵ Кафедра будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61000, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-31-07, e-mail: gvozduksasha@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-7856-9094

Анотація. *Постановка проблеми* Розглянуто властивості композитного матеріалу, призначеного для зовнішнього посилення залізобетонних конструкцій. Отримані результати дають змогу оцінити стійкість матеріалу до агресивних чинників, що є ключовим для визначення його ефективності та довговічності в умовах експлуатації. Проведені дослідження підтверджують доцільність використання композитного матеріалу для підсилення конструкцій, підкреслюючи його потенціал у забезпеченні надійності та тривалого терміну служби залізобетонних елементів. На основі отриманих даних рекомендується впровадження класу будівельних виробів і конструкцій, посилені стрічковою склопластиковою арматурою. **Мета роботи.** Для розширення застосування склопластиків у будівництві необхідно вирішити ряд завдань, пов'язаних з вибором найбільш відповідних типів склопластикового матеріалу, а також оцінкою довговічності та надійності конструкцій, що отримуються. Метою дослідження є вивчення властивостей композитного матеріалу, що використовується для зовнішнього підсилення залізобетонних конструкцій, які визначають його стійкість до агресивних факторів, з метою оцінки його ефективності та довговічності в умовах експлуатації. **Висновки.** У статті було досліджено властивості композитного матеріалу, призначеного для зовнішнього підсилення залізобетонних конструкцій. Отримані результати дозволяють оцінити стійкість матеріалу до агресивних факторів, що є ключовим для визначення його ефективності та довговічності в умовах експлуатації. Проведені дослідження підтверджують доцільність використання композитного матеріалу для підсилення конструкцій, підкреслюючи його потенціал у забезпеченні надійності та тривалого терміну служби залізобетонних елементів.

Ключові слова: склопластикова стрічка; водопоглинання; коефіцієнт дифузії; коефіцієнт сорбції; коефіцієнт проникності зовнішнє підсилення

RESEARCH OF THE RESISTANCE OF COMPOSITE MATERIAL FOR EXTERNAL ENHANCEMENT OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES TO THE INFLUENCE OF AGGRESSIVE FACTORS

PUSTOVOITOVA O.M.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
FIRSOV P.M.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KAMCHATNA S.M.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
OREL Yev.F.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
GVOZDUK O.A.⁵, *Pochtgrad. Stud.*

^{1*} Department of Building Constructions, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Bazhanova Str., Kharkiv, 61000, Ukraine, tel. +38 (057) 707-31-07, e-mail: oksana_pustov@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-4774-6686

² Department of Building Constructions, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Bazhanova Str., Kharkiv, 61000, Ukraine, tel. +38 (057) 707-31-07, e-mail: pavelfirsov1991@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9119-3968

³ Department of Higher Mathematics and Physics, Ukrainian State University of Railway Transport in Kharkiv, 7, Feuerbach Square, Kharkiv, 61001, Ukraine, tel. +38 (057) 730-19-21, e-mail: kamchatna.s.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5711-4146

⁴ Department of Research and Designing of Communication, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Railway Transport in Kharkiv, 7, Feuerbach Square, Kharkiv, 61001, Ukraine, tel. +38 (057) 730-19-21, e-mail: orel_fisherman@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-6261-1558

⁵ Department of Building Constructions, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Bazhanova Str., Kharkiv, 61000, Ukraine, tel. +38 (057) 707-31-07, e-mail: gvozduksasha@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-7856-9094

Abstract. Problem statement. The article studies the properties of composite material intended for external reinforcement of reinforced concrete structures. The obtained results make it possible to evaluate the material resistance to aggressive factors, which is the key to determine its efficiency and durability under operating conditions. The conducted research confirms the feasibility of using composite material for reinforcement of structures, emphasizing its potential in providing reliability and long service life of reinforced concrete elements. On the basis of the obtained data it is recommended to introduce a class of building products and structures reinforced with strick fiberglass reinforcement. **The purpose of the article.** To expand the use of fiberglass in construction, it is necessary to solve a number of problems related to the selection of the most suitable types of fiberglass material, as well as the assessment of the durability and reliability of the resulting structures. The aim of the study is to investigate the properties of a composite material used for external reinforcement of reinforced concrete structures that determine its resistance to aggressive factors in order to assess its efficiency and durability in service. **Conclusions.** The paper investigates the properties of a composite material intended for external reinforcement of reinforced concrete structures. The results obtained allow us to assess the material's resistance to aggressive factors, which is key to determining its efficiency and durability in service. The conducted studies confirm the feasibility of using a composite material for reinforcing structures, emphasizing its potential in ensuring the reliability and long service life of reinforced concrete elements.

Keywords: fiberglass band; water absorption; diffusion coefficient; sorption coefficient; permeability coefficient external reinforcement

Постановка проблеми. Одним із ключових завдань сучасного будівництва є створення ефективних та довговічних виробів та конструкцій, особливо тих, що працюють в агресивних умовах експлуатації. Часто виникає необхідність розробки конструкцій з особливими властивостями, такими як немагнітність та діелектричність, що робить традиційні матеріали непридатними для таких цілей [1].

Сучасні наукові та технічні досягнення дозволяють розробляти будівельні вироби, що відповідають цим вимогам, за рахунок використання передових технологій на етапах проектування, виробництва та

експлуатації. Застосування пластмас у будівництві значно покращує експлуатаційні характеристики будівель та споруд, підвищуючи їхню довговічність та надійність, одночасно знижуючи їх вагу та скорочуючи терміни будівництва. Це також веде до економії металу [2].

Одним із найбільш затребуваних матеріалів у цьому напрямку є склопластики, що мають унікальне поєднання властивостей, які вигідно відрізняють їх від традиційних будівельних матеріалів. Завдяки своїм високим технічним характеристикам, склопластики вже знайшли широке застосування у різних

галузях промисловості, у тому числі й у будівництві, де вони використовуються для виготовлення конструкційних елементів та деталей.

Спостерігається стійка тенденція до збільшення використання склопластиків у будівельній галузі. Особливо перспективним є застосування склопластикової арматури для посилення бетонних конструкцій.

До залізобетону, як основного будівельного матеріалу, пред'являються все більш високі вимоги щодо міцності, тріщиностійкості та довговічності. Часто залізобетонні конструкції пошкоджуються через корозію сталевих арматур, особливо під впливом таких факторів, як атмосферні умови, морська вода, димові гази або електричні струми. У випадках, коли потрібні інженерні конструкції з діелектричними та немагнітними властивостями, використання сталевих арматур протипоказане. Традиційні методи підвищення ефективності залізобетонних конструкцій не вирішують усіх цих завдань.

Подальший розвиток залізобетонних конструкцій пов'язаний із впровадженням ефективних видів арматури, таких як неметалічна склопластикова арматура, яка здатна суттєво підвищити їх експлуатаційні характеристики.

Теоретичні та експериментальні дослідження, підтвердили можливість застосування склопластикової арматури на практиці [3; 4]. Основними перевагами склопластикової арматури в порівнянні з металевією є її висока корозійна стійкість, а також антимагнітні та діелектричні властивості. Склопластикова арматура легша за сталеву більш ніж втричі, а її характеристики міцності перевищують показники сталі в 3,5–4 рази.

Незважаючи на численні дослідження в цій галузі, існує безліч невирішених питань, що ускладнює широке застосування склопластикової арматури замість сталевієї. Зокрема, недостатньо вивчені хімічні взаємодії між бетоном та склопластиковією арматурією.

Потрібні подальші дослідження, спрямовані на вивчення властивостей склопластиковієї арматури, розробку ефективних методів армування, а також створення високотехнологічних виробів та конструкцій, які дозволять максимально використовувати фізико-хімічні та механічні властивості склопластику та бетону.

У представленій роботі, як армуючий матеріал запропонований тип арматури – стрічкова склопластикова арматура (ССПА).

ССПА – це високоефективний композиційний матеріал, який у поєднанні з бетоном та іншими будівельними матеріалами підходить для створення нових комплексних виробів. Можливість контролювати процес армування та керувати орієнтацією стрічкової арматури дозволяє створювати штучну анізотропію властивостей, що відповідає необхідним силовим та експлуатаційним навантаженням. ССПА виконує як зміцнювальні, так і захисні функції. Вона сприяє підвищенню міцності, довговічності, корозійної стійкості, а також покращенню екологічної безпеки, зниженню матеріаломісткості та металомісткості, зниженню маси конструкції, одночасно забезпечуючи високі показники діелектричних та магнітних властивостей.

Аналіз публікацій. Запропоновано [5; 6] використати скляне волокно для армування бетону, що було підтверджено експериментально. Складне волокно має ряд переваг: його щільність у 3,5 рази менша за щільність сталі, воно має низький коефіцієнт теплопровідності, високу вібростійкість і відмінні електрофізичні властивості. Складне волокно також відрізняється високою механічною міцністю.

Однак, є ряд недоліків: модуль пружності скляного волокна вдвічі вищий, ніж у бетону та окремі волокна, через природні властивості скла, чутливі до механічних впливів, особливо до ударів.

Особливе значення має питання хімічної взаємодії скляного волокна з вологим середовищем свіжоукладеного бетону. При повній гідратації цемент освоює близько

20 % води, а решта води залишається у вигляді адсорбованих плівок на твердих частинках. Арматура зі скляного волокна в бетоні тривалий час піддається дії вологи. Дослідження показують, що міцність скляного волокна на розрив у вологому середовищі дещо нижча, ніж у сухому, особливо при тривалому впливі навантаження (статична втома).

Звичайний цементний бетон характеризується високою лужністю водяних плівок. У залізобетонних конструкціях ці лужні плівки мають пасивну дію на сталеву арматуру, формуючи на її поверхні тонкий оксидний шар, який захищає метал від корозії. Однак лужне середовище надає інше вплив на скляне волокно, викликаючи рівномірне розчинення всіх його компонентів. Автоклавна обробка готових конструкцій під впливом пару високого тиску прискорює процес корозії скляного волокна, що в кінцевому підсумку може призвести до повної втрати міцності скляної арматури.

Один із шляхів запобігання цьому процесу – виключення контакту склопластикової арматури з агресивним середовищем бетону на стадії його твердіння. Серед розроблених методів є технологія безперервного намотування арматури на готову бетонну конструкцію (сердечник). Інший спосіб полягає у використанні склопластикової арматури в полімербетонних виробках, де середовище свіжоукладеного бетону не чинить агресивного впливу на склопластик.

За результатами проведених досліджень [7], було розроблено технологію виготовлення комбінованих будівельних конструкцій. Ця технологія забезпечує створення склопластикового каркасу з необхідними міцнісними та деформативними характеристиками. Також були досліджені короткочасні та тривалі характеристики міцності склопластикових елементів.

Мета статті. Для розширення застосування склопластиків у будівництві необхідно вирішити ряд завдань, пов'язаних з вибором найбільш відповідних типів

склопластикового матеріалу, а також оцінкою довговічності та надійності конструкцій, що отримуються.

Метою статті є – дослідити властивості композитного матеріалу, що використовується для зовнішнього підсилення залізобетонних конструкцій, які визначають його стійкість до агресивних факторів, з метою оцінки його ефективності та довговічності в умовах експлуатації.

Виклад матеріалу. Як армуючий матеріал пропонується використовувати стрічкову склопластикову арматуру (ССПА), яка є різновидом склопластикової арматури. Управління процесом безперервного армування (намотки) та завдання орієнтації стрічки дозволяють створювати штучну анізотропію властивостей, адаптовану до різних зовнішніх впливів як силовим, так і несиловим.

Стрічкова склопластикові арматура має ряд переваг перед іншими видами склопластикової арматури. Її використання методом намотування дозволяє легко формувати суцільні покриття, оболонки та інші елементи. Такі покриття можуть мати як постійну товщину, так і змінну довжину конструкції. Стрічкова форма особливо підходить для багатошарового намотування, забезпечуючи однорідну структуру склопластикової оболонки.

Застосування ССПА виправдано також за рахунок її високих специфічних властивостей, як-то висока міцність при розтягу і стійкість до корозії, що робить її кращим вибором широкого спектра будівельних завдань.

Для дослідження основних міцнісних та деформаційних характеристик даної арматури необхідно враховувати всю складність напружено-деформованого стану, характерного для безперервної арматури. Ключовими контрольованими параметрами в цьому випадку були: щільність склопластику, водопоглинання, хімічна стійкість, а також визначення оптимального вмісту сполучних компонентів та ступеня їх затвердіння.

Щільність склопластику визначалася методом гідростатичного зважування [8; 9]. Для випробувань були відібрані зразки склопластику, вирізані з ґратчастих елементів каркасу, які зважувалися на аналітичних вагах з точністю до 0,0002 г. Зразки занурювали в етиловий спирт для видалення повітряних бульбашок, потім витягували та акуратно витирали фільтрувальним папером.

Зразки по черзі підвішувалися на тонкому дроті до коромисла ваги, після чого під зразок поміщали ємність з етиловим спиртом для проведення повторного зважування. Для цього ємність з етиловим спиртом встановлювали на окрему підставку, не пов'язану з чашкою терезів, занурювали зразок у рідину і проводили зважування, після чого окремо зважували дріт без зразка.

Щільність склопластику розраховували за формулою:

$$\rho = \frac{g}{g - (b_1 - b_2)} \cdot \rho_0, \quad (1)$$

де g – маса зразка на повітрі, г; b_1 – маса зразка та дріт в спирті, г; b_2 – маса дроту в спирті, г; ρ_0 – щільність спирту при 20 °С, г/см³.

Як результат випробувань було прийнято середнє арифметичне всіх вимірювань, за підсумками яких щільність склопластику склала 1,8 г/см³.

Водостійкість склопластику залежить від наявності пор та мікротріщин, а також від водостійкості сполучного матеріалу та скловолокна, використаного в композиції. Водостійкість сполучного визначається присутністю полярних груп у затверділому полімері [10]. Майже всі епоксидні сполучні містять полярні групи, такі як гідроксильні та амінні. Збільшення кількості таких груп у складі сполучного призводить до погіршення водостійкості склопластиків.

Додавання інертних пластифікаторів, таких як дибутилфталат, також знижує водостійкість сполучного, оскільки послаблює міжмолекулярні взаємодії.

Зниження міцності скловолокна під впливом вологи пов'язане з адсорбцією води

на поверхні скла та хімічним руйнуванням волокон, зокрема через вимивання водорозчинних компонентів скла. Водостійкість скловолокна зростає при зменшенні вмісту лужних компонентів у складі скла.

У зв'язку з цим було необхідно провести дослідження з визначення водопоглинання отриманого склопластику в залежності від часу його знаходження у воді при температурі 20 °С. Водопоглинання визначалося як відсоток вологи, набраної зразком за певний час.

Для цього виготовили склопластик за тією ж рецептурою та технологією, що і для ґратчастих каркасів, товщиною 3 мм. З матеріалу було вирізано зразки шириною 50±1 мм, торці яких закрили сполучним того ж складу. Підготовлені зразки поміщали в сушильну шафу при температурі 105±2 °С і висушували до досягнення постійної маси. Потім зразки занурювали ексікатор з дистильованою водою.

Через певні інтервали часу зразки витягували, витирали фільтрувальним папером і одразу зважували. Відсоток водопоглинання розраховувався як різниця між масою зразків до та після перебування у воді.

На рисунку 1 показано залежність водопоглинання склопластику від часу його знаходження у воді. Як видно, найбільший відсоток вологи (0,08 %) склопластик набирає у першу добу, після чого процес уповільнюється та стабілізується до 50 діб. Порівнюючи отримані результати водопоглинання за 24 години з відомими характеристиками конструкційних склопластиків можна оцінити придатність досліджуваного матеріалу.

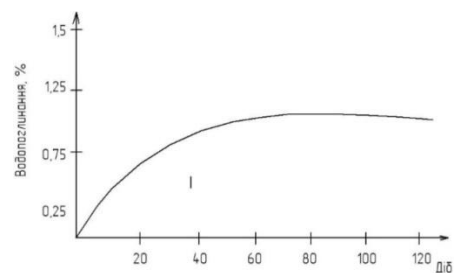


Рис. 1. Залежність вимірювання водопоглинання склопластику від тривалості перебування у дистильованій воді

Відомо, що епоксидний склопластик має високу хімічну стійкість до агресивних середовищ. Однак його стійкість значною мірою залежить від технології виробництва та складу вихідних компонентів.

Склопластикові каркаси, що входять до складу елементів дахів, можуть піддаватися впливу парів агресивних середовищ, таких як кислоти та луги, як у промислових умовах, так і сільському господарстві. Концентрація агресивних рідин у повітрі покриття зазвичай невисока. Для оцінки хімічної стійкості епоксидного склопластику, виготовленого «мокрим» способом методом намотування косої перехресної структури з використанням затверджувача «гарячого» типу - третинного аміну, в якості хімічних реагентів було обрано 10 % розчин NaOH і 5 % розчин H₂SO₄.

До випробування було підготовлені зразки шириною 50±1 мм та товщиною 3±0,2 мм, вирізаних із спеціально виготовленого склопластику. Як сполучний матеріал застосовувалася епоксидна діанова смола ЕД-20, затверділий триетаноламін з додаванням пластифікатора дибутилфталата.

Метод випробування полягав у вимірі зміни маси зразків до та після їх витримання в агресивному середовищі протягом певного часу. Перед початком випробувань зразки кондиціонували при температурі 20±2 °С в умовах, що виключають вплив світла.

Зважування зразків проводилося на аналітичних вагах з точністю до 0,0002 г. Час витримки зразків у 10 % розчині NaOH і 5 % розчині H₂SO₄ склало 90 діб за 20±2 °С.

Зважування зразків проводилося через 24, 48, 72 години і далі кожні 5 діб.

Зміну маси зразків після кожного проміжку випробувань (ΔM) в % обчислювали за формулою:

$$\Delta M = \frac{M_1 - M}{M} \cdot 100, \quad (2)$$

де M – маса зразка до занурення в хімічний реагент, г;

M_1 – маса зразка після витримки його в хімічному реагенті, г.

За отриманими результатами будувалася графічна залежність $\Delta M = f(r)$ (рис. 2).

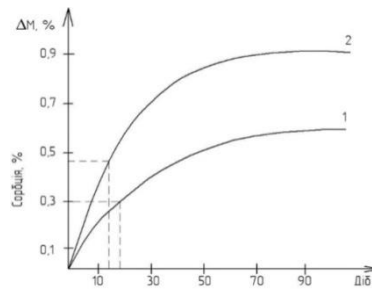


Рис. 2. Кінетика сорбції склопластику:
1 – у 10 % розчині NaOH; 2 – в 5 % розчині H₂SO₄

За графіком визначалося час, за яке відбулося збільшення маси зразка до величини $M_{\max}/2$ і обчислювався коефіцієнт дифузії хімічних реагентів (D):

$$D = 0,0494 \left(\frac{r_0}{\delta^2} \right)^{-1}. \quad (3)$$

Коефіцієнт сорбції хімічних реагентів в зразках (ρ) визначали по залежності:

$$\rho = \frac{M_p}{V_{\max}}, \quad (4)$$

$$M_p = M_{\max} - M_1. \quad (5)$$

Коефіцієнт проникності хімічного реагенту в склопластику (p) вираховували за залежністю:

$$p = D \cdot S. \quad (6)$$

Таблиця

Значення коефіцієнта дифузії, сорбції, проникності склопластикових зразків

Розчин	Коефіцієнт дифузії м ² /с	Коефіцієнт сорбції %	Коефіцієнт проникності м ² /с
NaOH	2,6·10 ⁻⁹	0,0213	0,554·10 ⁻¹²
H ₂ SO ₄	3,7·10 ⁻⁹	0,0276	10,2·10 ⁻¹¹

Результати обробки – у таблиці.

Висновки

У статті досліджені властивості композитного матеріалу, призначеного для зовнішнього підсилення залізобетонних конструкцій. Отримані результати дозволяють оцінити стійкість матеріалу до

агресивних факторів, що є ключовим для визначення його ефективності та довговічності в умовах експлуатації. Проведені дослідження підтверджують доцільність використання композитного матеріалу для підсилення конструкцій, підкреслюючи його потенціал у забезпеченні надійності та тривалого терміну служби залізобетонних елементів.

На підставі отриманих даних рекомендується впровадження класу будівельних виробів та конструкцій,

підсиленних стрічковою склопластиковою арматурою. Така арматура здатна одночасно виконувати як зміцнювальні, так і захисні функції. Вона забезпечує значне покращення експлуатаційних характеристик, включаючи підвищення міцності та довговічності матеріалів, а також корозійну стійкість та екологічну безпеку. Крім цього, використання склопластикової арматури сприяє зниженню матеріаломісткості та металомісткості конструкцій, зменшуючи їх загальну масу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Petro S. H., Kemp E. L., Gangarao H. V. S. Saving covered bridges with glass-fiber-reinforced polymers. *APT Bulletin : The Journal of Preservation Technology*. 2004. № 35 (4). Pp. 27–34. URL: <http://dx.doi.org/10.2307/4126417>
2. Avdeeva A., Shlykova I., Antonova M., Barabanschikov Y., Belyaeva S. Reinforcement of concrete structures by fiberglass rods. *MATEC Web of Conferences*. 2016. № 53, art. 01006. URL: <http://www.matec-conferences.org/doi:10.1051/mateconf/20165301006>
3. Trykoz L. V., Kamchatnaya S. M., Pustovoitova O. M., Atynian A. O. The investigation of prestressed pressure pipes, reinforced with fiberglass plastic. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018. № 36. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85048021864&origin=resultslist>
4. Trykoz L., Pustovoitova O., Kamchatnaya S., Semenova-Kulish V. Fiberglass coating of railway culvert pipes. *International Scientific Conference on Transport Means*. Kaunas 30 September 2020 Kauno Technologijos Universitetas. Pp. 442–445. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190687096>
5. Колесников А. В., Семенова С. В., Вировой В. М., Олійник Т. П. Будівельні композити як об'єкти системного аналізу. *Сучасне будівництво та архітектура: збірник наукових праць*. 2023. № 3. С. 41–49. URL: <http://visnyk-odaba.org.ua/2023-03/3-5.pdf>
6. Maranan G. B., Manalo A. C., Benmokrane B., Karunasena W., Mendis P. Behavior of concentrically loaded geopolymer-concrete circular columns reinforced longitudinally and transversely with GFRP bars. *Engineering Structures*. 2016. № 117. Pp. 422–436. URL: <http://www.journals.elsevier.com/engineering-structures/>
7. Hegemier G., Stewart L. Application of fiber-reinforced polymers to reinforced concrete bridges. *Innovative Bridge Design Handbook : Construction, Rehabilitation and Maintenance*. 2016. Pp. 777–794. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128000588/>
8. Petro S. H., Kemp E. L., Gangarao H. V. S. Saving covered bridges with glass-fiber-reinforced polymers. *APT Bulletin : The Journal of Preservation Technology*. 2004. № 35 (4). Pp. 27–34. URL: <http://dx.doi.org/10.2307/4126417>
9. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Аксьонов С. Ю., Делі О. В. Застосування огороження склопластикового композитного перильного. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 23. С. 214–224.
10. Тунік Т. М., Медведєва О. В., Кропивний В. М., Кирнасовська Т. Є. Хімічні процеси в будівельній галузі : навч. посіб. Кропивницький : ЦНТУ, 2020. 59 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/10764>

REFERENCES

1. Petro S.H., Kemp E.L. and Gangarao H.V.S. Saving covered bridges with glass-fiber-reinforced polymers. *APT Bulletin : The Journal of Preservation Technology*. 2004, no. 35 (4), pp. 27–34. URL: <http://dx.doi.org/10.2307/4126417>
2. Avdeeva A., Shlykova I., Antonova M., Barabanschikov Y. and Belyaeva S. Reinforcement of concrete structures by fiberglass rods. *MATEC Web of Conferences*. 2016, no. 53, art. 01006. URL: <http://www.matec-conferences.org/doi:10.1051/mateconf/20165301006>
3. Trykoz L.V., Kamchatnaya S.M., Pustovoitova O.M. and Atynian A.O. The investigation of prestressed pressure pipes, reinforced with fiberglass plastic. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018, no. 36. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85048021864&origin=resultslist>
4. Trykoz L., Pustovoitova O., Kamchatnaya S. and Semenova-Kulish V. Fiberglass coating of railway culvert pipes. *International Scientific Conference on Transport Means*. Kaunas 30 September 2020 Kauno Technologijos Universitetas. Pp. 442–445. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190687096>

5. Kolesnykov A.V., Semenova S.V., Vyrovoy V.M. and Oliinyk T.P. *Budivel'ni kompozyty yak ob'ekty systemnoho analizu* [Building composites as objects of system analysis]. *Suchasne budivnytstvo ta arkhitektura zbirnyk naukovykh prats'* [Modern Construction and Architecture : collection of scientific works]. 2023, no. 3, pp. 41–49. URL: <http://visnyk-odaba.org.ua/2023-03/3-5.pdf> (in Ukrainian).
6. Maranan G.B., Manalo A.C., Benmokrane B., Karunasena W. and Mendis P. Behavior of concentrically loaded geopolymer-concrete circular columns reinforced longitudinally and transversely with GFRP bars. *Engineering Structures*. 2016, no. 117, pp. 422–436. URL: <http://www.journals.elsevier.com/engineering-structures/>
7. Hegemier G. and Stewart L. Application of fiber-reinforced polymers to reinforced concrete bridges. *Innovative Bridge Design Handbook : Construction, Rehabilitation and Maintenance*. 2016, pp. 777–794. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128000588/>
8. Petro S.H., Kemp E.L. and Gangarao H.V.S. Saving covered bridges with glass-fiber-reinforced polymers. *APT Bulletin : The Journal of Preservation Technology*. 2004, no. 35 (4), pp. 27–34. URL: <http://dx.doi.org/10.2307/4126417>
9. Onyshchenko A.M., Harkusha M.V., Aksonov S.Yu. and Deli O.V. *Zastosuvannia ohorodzhennia skloplastikovoho kompozytnoho perylnoho* [Application of fiberglass composite railing fencing]. *Dorohy i mosty* [Roads and Bridges]. 2021, vol. 23, pp. 214–224. (in Ukrainian).
10. Tunik T.M., Medvedieva O.V., Kropivnyi V.M. and Kyrnasovska T.Ye. *Khimichni protsesy v budivelnii haluzi: navch. posib.* [Chemical processes in the construction industry: a teaching manual]. Kropyvnytskyi : TsNTU, 2020, 59 p. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/10764> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 23.02.2025.

УДК 658.382:613.64:621.8.035

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.120.1151

РОЗРОБКА УСТАНОВКИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕНОСТІ ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
СТРЕЖЕКУРОВ Ю. Е.^{2*}, *асп.*

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

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

Анотація. Постановка проблеми. На петургійних, метаталурнійних та склоплавних виробництвах де використовуються високотемпературні технологічні процеси існує проблема перегріву працівників через значне теплове навантаження. При використанні засобів індивідуального захисту виникає необхідність вивчення та перевірки якісних характеристик цих засобів за для зменшення впливу теплового потоку на людину. А отже існує необхідність розробки устаткування ІЧ випромінювання та проведення досліджень в лабораторних умовах наближених до реальної виробничої обстановки, а саме: з урахуванням впливу атмосферних факторів; особливості геометрії приміщення; геометрії первинного та вторинних джерел ІЧ випромінювання; різних видів ЗІЗ. **Мета статті** – постановка експеримента дослідження впливу високотемпературного обладнання на працівника в умовах наближених до реальних. До основних завдань належить: розробка конструкції установки моделювання високотемпературного джерела випромінювання зі змінними характеристиками; розробка функціональної схеми фізичного дослідження опромінювання працівника; розробка алгоритма проведення дослідження термодинамічного навантаження на робочих місцях з урахуванням факторів впливу на розповсюдження ІЧ променів. **Висновок.** Застосування установки для моделювання високотемпературного джерела опромінювання дозволяє провести низку експериментів та досліджень з розповсюдження ІЧ променів і впливу їх на людину змінюючи: геометрію мішені відносно установки; зміна геометрії і властивостей внутрішньої поверхні приміщення та розміщення мішені відносно стін; змінюючи склад та домішок у повітрі дослідити відхилення та накладання ІЧ променів за для подальших ідей в інноваціях.

Ключові слова: *постановка експеримента; високотемпературні джерела випромінювання; установка для моделювання; алгоритм проведення дослідження; термодинамічне навантаження; на родочих місцях; вразування домішок і забрудненості повітря*

DEVELOPMENT OF THE INSTALLATION OF PHYSICAL MODELING OF SPREAD OF HEAT RADIATION AND CONDUCTING RESEARCH

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
STREZHEKUROV Yu.E.^{2*}, *Postgrad. Stud.*

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

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

Abstract. Problem statement. At metallurgical, metalworking and glass manufacturing enterprises using high-temperature technological processes, workers are at risk of overheating due to significant thermal load. When using personal protective equipment, it is necessary to study and verify the actual characteristics of these means to reduce the impact of heat flux on the human body. Therefore, there is a need to develop infrared radiation equipment and conduct research under laboratory conditions approximating the actual production environment, namely: taking into account the

influence of atmospheric factors; features of room geometry; geometry of primary and secondary infrared radiation sources; various types of personal protective equipment. Therefore, there is a need to develop infrared radiation equipment and conduct research under laboratory conditions approximating the actual production environment, namely: taking into account the influence of atmospheric factors; features of room geometry; geometry of primary and secondary infrared radiation sources; various types of personal protective equipment. **The main objectives include** – The experimental setup is to study the effect of high-temperature equipment on workers under conditions approximating real ones. The main tasks are: development of the design of an installation for modeling a high-temperature radiation source with variable characteristics; development of a functional diagram of the physical study of irradiation of workers; development of the research procedure algorithm taking into account the factors influencing the distribution of infrared rays at workplaces. **Conclusion.** The use of the installation for modeling a high-temperature radiation source allows to conduct a number of experiments and studies on the distribution of infrared rays and their effects on humans by changing: The geometry of the target relative to the installation; Changing the geometry and properties of the inner surface of the room and placement of the target relative to the walls; By changing the composition and concentration in the air, investigate the deviations and overlaps of infrared rays for further innovations.

Keywords: *experimental setup; high-temperature radiation sources; installation for modeling; research procedure algorithm; thermal load; at workplaces; impact of impurities and air contamination*

Постановка проблеми. На сучасних виробництвах металургійної та петургійної галузей, де застосовуються високотемпературні технологічні процеси, для запобігання впливу високотемпературних навантажень, які негативно впливають на стан та працездатність працівників, повинні використовувати засоби індивідуального захисту сертифіковані виробником. Але як показав проведені нами дослідження на підприємствах велика кількість ЗІЗ яка застосовується, моральна застарілі, а інколи і саморобні. В свою чергу ЗІЗ які мають сертифікати від виробника використовують понад їх експлуатаційного терміна через що втрачають свої захисні якості без видимих зовні дефектів.

Тому виникає потреба у випробуваннях та повірки наявних ЗІЗ в умовах наближених до реальних у виробництві.

Аналіз публікацій. Аналіз наукових досліджень показав, що необхідно обґрунтувати та розробити експериментальну установку для оцінки рівнів теплового опромінення на робочих місцях. Як раніше продемонстровано [1–2; 6], існуючі методики розрахунку параметрів джерел теплового опромінення, що ґрунтуються на стандартних графіках та таблицях, мають певні обмеження для точної оцінки умов теплозахисту працівників на конкретному виробництві.

Неточності результатів виникають через усереднені значення окремих параметрів (температура технологічного обладнання, ступінь поглинання випромінювання, характеристики ЗІЗ, відстань до вторинних джерел ІЧ випромінювання тощо), які не враховують специфіки кожного виробництва. Зокрема, не беруться до уваги такі чинники як вплив домішок у повітрі та стан ЗІЗ, що унеможлиблює повну оцінку рівнів опромінення на робочих місцях з використанням номограм та формул.

У той же час, для ефективного теплозахисту працівників необхідні фактичні дані рівнів терморадіаційного навантаження на кожному робочому місці в реальних виробничих умовах з урахуванням реально експлуатованих ЗІЗ.

Мета дослідження – постановка експеримента дослідження впливу високотемпературного обладнання на працівника в умовах наближених до реальних. До основних завдань належить: розробка конструкції установки моделювання високотемпературного джерела випромінювання зі змінними характеристиками; розробка функціональної схеми фізичного дослідження опромінювання працівника; розробка алгоритма проведення дослідження термодинамічного навантаження на робочих місцях з урахуванням факторів впливу на розповсюдження ІЧ променів.

Результати досліджень. Згідно проведеного аналізу методики яка наведена в роботі [3; 5] нами запропоновано

використовувати підхід який ґрунтується на фізичному моделюванні ІЧ випромінювання та враховує явища інтерференції та дифракції.

При цьому, нами вперше запропоновано враховувати основні фактори, які впливають на розповсюдження ІЧ випромінювання, повітряне середовище, рівень аерогелів та аерозолів повітря, розміри площі та об'єму і температурно-вологісний режим у приміщеннях розміри робочих місць, віддзеркалення та поглинання внутрішніх поверхонь цехів [7–8].

Тому виникла потреба розробки єдиного комп'ютерного інструментарію, що дозволить в одному алгоритмі стисло формалізувати усі етапи обчислень на основі вхідних параметрів та одержувати результати в зручному для аналізу вигляді.

Це спростить практичне застосування математичних моделей теплового випромінювання та дозволить ефективніше розв'язувати актуальні інженерні завдання.

Для проведення дослідження нами було розроблена експериментальна установка (рис. 1).

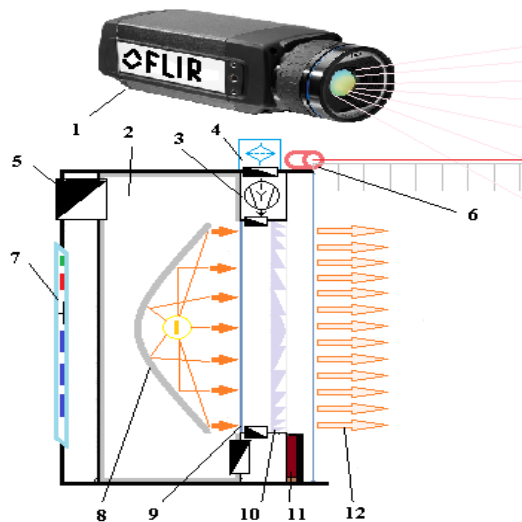


Рис. 1. Функціональна схема установки фізичного дослідження поширення теплової енергії

Склад та технічні характеристики експериментальної установки:

- 1) ІЧ камера FLIR A65sc;
- 2) світлова камера;
- 3) осьовий вентилятор;
- 4) повітряний фільтр;
- 5) вентиляційні отвори між відсіками установки;

6) лазерний дальномір Bosch DLE 50;

7) панель керування для зміни характеристик ІЧ випромінювання;

8) паробалічне дзеркало з лампою розжарювання у фокусі 1 кВт;

9) жароміцні захистні скло;

10) лінза Френеля;

11) рухомі шторки;

12) плоскопаралельні ІЧ випромінювання.

Також для проведення дослідження використано Промисловий міні ПК Gole F7 для моделювання та обробка експериментальних даних. А також Осцилограф Tektronix MDO3000 для реєстрація часових характеристик інтенсивності променя ІЧ випромінювання.

Проведення дослідження на розробленій нами установці рисунок 1 проводились наступними етапами:

- 1) Підготовка установки до досліджу;
- 2) Створення умов відповідно до обраного дослідження;
- 3) Проведення вимірювання та фіксація отриманих даних;
- 4) Перетворення даних у графічне зображення.

Вимірювання та фіксація температури на мішені, що опромінювалась, проводилась за наступними правилами:

- мішені розміщувалась так щоб уникнути впливу на них сонячних променів, нагрівальних чи охолоджуючих пристроїв;
- реєстрацію показників роботи через 5–10 хв. після розміщення;
- температурний режим для дослідження здійснюють у горизонтальному та вертикальному напрямках.

Нами було прийняте рішення використовувати світлове моделювання для оцінки інтенсивності розподілу ІЧ випромінювання на робочих місцях. Так як енергетична та світлова освітленість змінюється за однаковими законами, то в якості джерела ІЧ випромінювання використовується рівномірно освітлений екран. В якості тіла людини використовувалась плоска мішень в натуральну величину середньо статистичної людини, покрити чорною матовою фарбою, що відповідає можливості вимірювання

температури на поверхні робітника в одязі, температура якого фіксувалась ІЧ камерою FLIR A65sc.

Це дозволяє вирішити задачу не тільки дослідження інтенсивності розподілу температурно-динамічного навантаження, а і одночасно прогнозувати температуру поверхні об'єкта не певній відстані.

Для проведення досліджень нами запропонований алгоритм дослідження розповсюдження ІЧ випромінювання в середовищі. На рисунку 2 наведено алгоритм поширення теплової енергії в однорідному повітряному середовищі (без аерогелів та аерозолів).

Проведений нами аналіз показав, що характеристики турбулентності атмосферних аерогелів та аерозолів, впливають на можливості поширення інфрачервоного променя випромінювання [4].



Рис. 2. Алгоритм поширення теплової енергії в однорідному повітряному середовищі (без аерогелів та аерозолів)

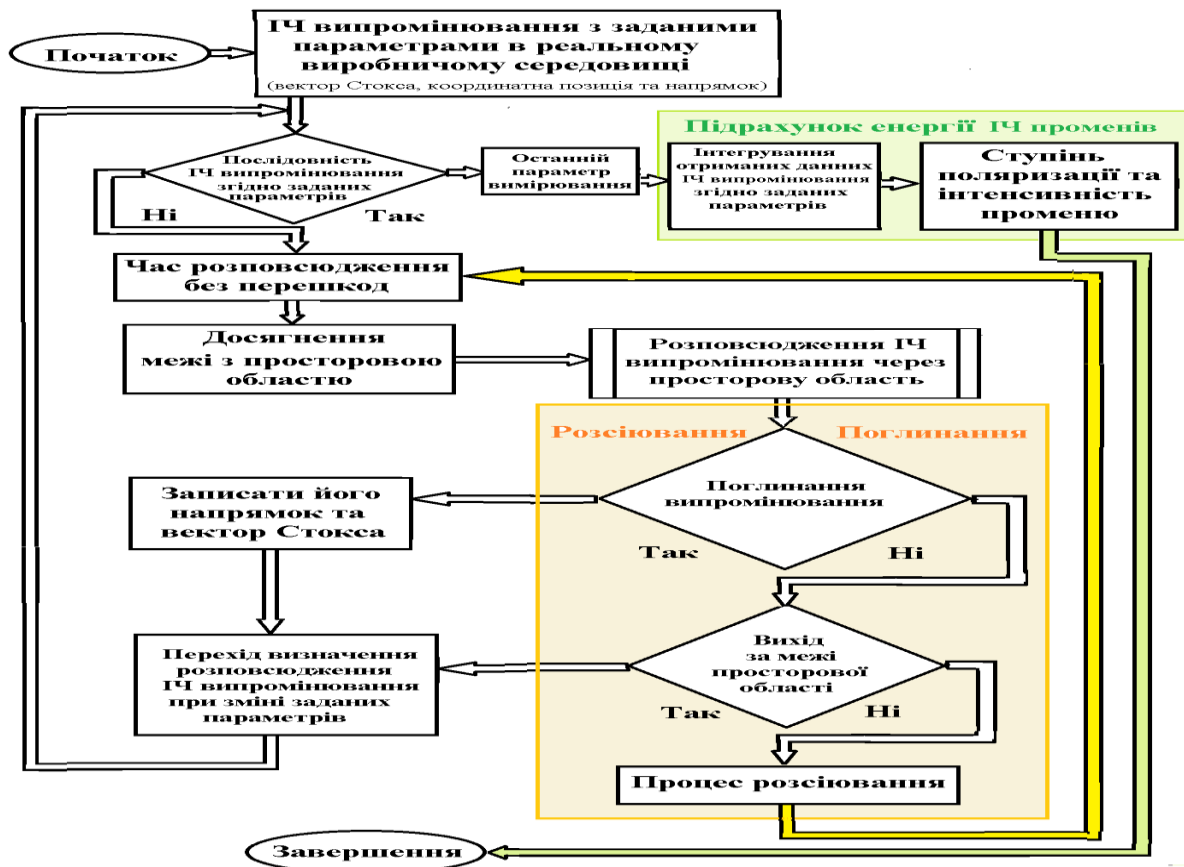


Рис. 3. Алгоритм проведення дослідження термодинамічного навантаження на робочих місцях з урахуванням забрудненості повітряного простору

Тому нами був запропонований алгоритм проведення дослідження, який дозволяє проводити комплексну оцінку теплового впливу на робочих місцях підприємств зі значним забрудненням, з урахуванням поєднання експериментальних та обчислювальних методів отримання даних, забезпечуючи безпеку вимірювань і більшу достовірність (рис. 3). Даний алгоритм призначений для програмування обчислювальної техніки.

Згідно запропонованого підходу оцінки термодинамічного навантаження на працівників до реальних умов, використовувалось в установці рисунок 1 додаткове обладнання:

- Газоаерозольний генератор – для створення середовища з заданою концентрацією та розміром частинок аерозолі. Модель Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer TSI 3321 генерує частинки розміром від 0.5 до 20 мкм; контроль концентрації та складу аерозолі; можливість підігріву газу-носія до 1 000 °C.

- Мікроскоп – контроль розміру та форми частинок аерозолі. модель ОПТИКА XSP-16PRO; збільшення 1600×, мінімальне 75×; роздільна здатність до 0,34 мкм при макс. збільшенні дозволяє досліджувати частинки нанометрового розміру; наявність USB, HDMI інтерфейсу.

- Зразкоотбірник для репрезентативного зразка повітря з виробничого середовища. модель Dekati FPS-4000; Розділення частинок за розмірами в діапазоні 0,03–10 мкм.

При цьому необхідно акцентувати увагу, що ця установка дозволяє моделювати і вирішувати відтворення умов наближених до реальних та проведення вимірювань у широкому застосуванні.

На етапі запропонованого підходу інтенсивність випромінювання оцінили розповсюдження теплової енергії в умовах наближених до реальних характеристик повітряного простору на підприємстві з виробництва феросплавів ТОВ «ПромЕнергія».

Висновки

1. Аналіз показав що установка на обертовому столі дозволяє з одного боку проводити вимірювання як при нерухомому джерелі випромінювання в фронтальній площині, так і зробити діаграму розповсюдження на 360 °.

2. При вирішенні поставленої нами задачі, а саме статичне джерело випромінювання в фронтальній площині було визначено похибки:

- середня квадратична похибка джерела складає менш 6–8 % для всієї площини вимірювання до 72 °;

- від 72 ° до 86 ° похибка не більш 19 %;

- у випадку при куті 86–90 ° відносно мішені, яка паралельна площині випромінювання джерела вимірювання втрачають сенс з точки зору величини похибки, і потребують зміни взаєморозтошування джерела та мішені.

3. Результати вимірювання можна застосовувати задовільною точністю для інженерних розрахунків у широкому діапазоні нерівномірно нагрітих поверхонь.

4. Результати експериментального моделювання наближені максимально до реальних умов дозволяють побудувати діаграму енергетичного профілю інтенсивності розподілу температурно-динамічного навантаження в секторі 360 ° по сітці координат через 45 ° у горизонтальній площині на робочих місцях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шаленний В. Т., Шаломов В. А., Папірник Р. Б. Напрямки удосконалення сучасних технологій, матеріалів і обладнання із врахуванням енергетичних витрат та умов праці будівельних робітників. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение*. 2010. Вип. 52. С. 127–131.

2. Беліков А. С., Шаломов В. А., Рагімов С. Ю., Михайлов М. О. Фізичне моделювання зміни енергетичного впливу на робочі місця з урахуванням високотемпературного випромінювання. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. Вип. 4. С. 10–17.

3. Стрежекуров Э. Е. Комплексное решение задач теплозащиты рабочих мест и охраны окружающей среды от теплового загрязнения. *Приборы для экологии-92*. 1992.
4. Біляєв М. М. Математичне моделювання розрахунку параметрів мікроклімату в робочих зонах. *Проблеми математичного моделювання*. 2020. С. 6–8.
5. Стрежекуров Ю. Е. Аналіз впливу негативних та шкідливих факторів на виникнення професійних захворювань. *Безпека життєдіяльності в XXI столітті*. 2024.
6. Стрежекуров Ю. Е. Ukrainian research schools negative thermal factors at workplaces. *Виклики та проблеми сучасної науки*. 2023. С. 598–610.
7. Беліков А. С., Стрежекуров Ю. Е., Шаломов В. А., Рагімов С. Ю. До питання комплексного впливу негативних та шкідливих факторів на виникнення професійних захворювань. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. Вип. 1. С. 26–32.
8. Беліков А. С., Стрежекуров Ю. Е., Рагімов С. Ю., Харченко В. В. До питання комплексного оцінки впливу теплового випромінювання на робочих місцях з урахуванням забруднення повітряного середовища. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. Вип. 6. С. 7–15.

REFERENCES

1. Shalennuy V.T., Shalomov V.A. and Papirnyuk R.B. *Napriamki udoskonalennia suchasnykh tekhnologiy, materialiv i obladannia iz vrakhuvanniam energetychnykh vutrat ta umov pratsi budivel'nykh robnyukiv* [Directions for improving modern technologies, materials and equipment, taking into account energy costs and working conditions of construction workers]. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie* [Construction. Materials Science. Mechanical Engineering]. 2010, no. 52, pp. 127–131. (in Ukrainian).
2. Bielikov A.S., Shalomov V.A., Ragimov S.Yu. and Mukhaylov M.O. *Fizychne modeliuвання zminu energetychnogo vplyvu na robochi mista z urakhuvanniam vysokotemperaturnogo vyprominiuvannya* [Physical modeling of changes in energy impact on workplaces taking into account high-temperature radiation]. *Visnyk Prydniprovs'koi derzhpavoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2017, no. 4, pp. 10–17. (in Ukrainian).
3. Strezhekurov E.E. *Kompleksnoie reshenie zadach teplozashchity rabochikh mest i okhrany okruzhaiushchei sredy ot teplovogo zagriazaniia* [A comprehensive solution to the problems of thermal protection of workplaces and environmental protection from thermal pollution]. *Priboru dlia ekologii-92* [Devices for Ecology-92]. 1992. (in Russian).
4. Bilaiev M.M. *Matematichne modeliuvanriia rozrachku parametriv mikroklimatu v robochikh zonakh* [Mathematical modeling of the calculation of microclimate parameters in working areas]. *Problemu matematichnogo modeliuвання* [Problems of Mathematical Modeling]. 2020, pp. 6–8. (in Ukrainian).
5. Strezhekurov Yu.E. *Analiz vplyvu negativnih ta shkidlivih faktoriv na viniknennia profesiynih zahvoryuvan* [Analysis of the influence of negative and harmful factors on the emergence of occupational diseases]. *Bezpeka zhitediyalnosti v XXI stoliti* [Life Safety in the XXI Century]. 2024. (in Ukrainian).
6. Strezhekurov Yu.E. [Ukrainian research schools negative thermal factors at workplaces]. *Vikliki ta problemy suchasnoy nauki* [Challenges and Problems of Modern Science]. 2023, pp. 598–610.
7. Bielikov A.S., Strezhekurov Yu.E., Shalomov V.A. and Ragimov S.Yu. *Do pitanya kompleksnogo vplyvu negativnih ta shkidlivih faktorivna viniknennia profesiynih zahvoryuvan* [To the question of the complex impact of negative and harmful factors on the emergence of occupational diseases]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2024, no. 1, pp. 26–32. (in Ukrainian).
8. Bielikov A.S., Strezhekurov Yu.E., Ragimov S.Yu. and Kharchenko V.V. *Do pitanya kompleksnogo ocinki vplyvu teplovogo viprominiuvannya na robochih misyach z urahuvanyam zabrudnennia povitryanogo seredovisha* [To the question of the complex assessment of the impact of heat radiation at workplaces taking into account air pollution]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 6, pp. 7–15. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 01.03.2025.

УДК 624.213+624.131

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.126.1152

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ В ПРОЦЕСІ СПОРУДЖЕННЯ НА СЛАБКИХ ҐРУНТАХ

ТРЕГУБ О. В.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
КОВАЛЬОВ В. В.², докт. техн. наук, доц.,
ЛАНДО Є. О.³, канд. техн. наук, доц.,
КОЧАН С. М.⁴, ас.,
АНДРЕЄВА І. Г.⁵, ас.

^{1*} Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

² Кафедра інженерної геології і геотехніки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: kovalov.viacheslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6731-4192

³ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: lando.evgen@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2608-931X

⁴ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: kochan.sergii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9099-0399

⁵ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: andreieva.iiryna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7083-8955

Анотація. *Постановка проблеми.* Забезпечення несучої здатності основ є актуальною проблемою при будівництві автомобільних доріг та штучних споруд на слабких ґрунтах. Метод попереднього привантаження основи забезпечує зміцнення слабких ґрунтів. Однак методика розрахунку та проектування земляного полотна з урахуванням особливостей взаємодії з ґрунтовою основою у процесі спорудження потребує удосконалення. *Метою досліджень* є удосконалення методики чисельного моделювання методом скінчених елементів (МСЕ) напружено-деформованого стану (НДС) земляного полотна автомобільних доріг у процесі спорудження на слабких ґрунтах з урахуванням їх попереднього обтиснення. *Результати досліджень.* Достовірність моделей ґрунтів оцінена тестовим чисельним моделюванням натурних випробувань основ дослідними фундаментами за ідеальною пружно-пластичною моделлю з критерієм міцності Мора-Кулона (Mohr-Coulomb model) та моделлю ізотропного зміцнення (Hardening Soil model) з використанням програми PLAXIS 3D. У роботі розглядалися задачі моделювання НДС при навантаженні та частковому розвантаженні (ефект попереднього обтиснення) шару слабого ґрунту у процесі спорудження земляного полотна автодороги; визначення часу стабілізації осідань; моделювання НДС при ущільненні слабого ґрунту з вертикальними піщаними дренами і фільтраційним шаром; моделювання земляного полотна на піщаній подушці. За даними чисельного моделювання визначені розміри зон зміцнення і пластичних деформацій у основі та допустимий тиск для забезпечення зміцнення ґрунту. Час консолідації ґрунту та стабілізації осідань основи розраховувався за даними розсіювання надлишкового порового тиску у шарі слабого водонасиченого ґрунту. Стійкість укосів земляного полотна перевірялась розрахунком «коефіцієнтів безпеки». *Висновки.* Для моделювання МСЕ НДС основ при навантаженні та частковому розвантаженні (ефект попереднього обтиснення) шару слабого ґрунту у процесі спорудження земляного полотна автодороги є доцільним використання пружно-пластичної моделі ізотропного зміцнення. Застосування методу привантаження фільтруючим насипом з улаштуванням вертикальних дрена забезпечить зміцнення слабких ґрунтів та підвищення несучої здатності основи у короткі терміни, що дозволить експлуатувати автодорогу без значних додаткових деформацій, тим самим підвищити її надійність в експлуатації. Розглянута методика чисельного моделювання МСЕ НДС може бути використана при проектуванні споруд на слабких ґрунтах, що передбачає розрахунки осідань і напружень, надлишкового порового тиску, часу консолідації, аналіз зон пластичних деформацій, зміцнення ґрунту і стійкості.

Ключові слова: чисельне моделювання; слабкі ґрунти; земляне полотно; попереднє обтиснення ґрунтів; автомобільна дорога

NUMERICAL MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE ROAD EMBANKMENT DURING CONSTRUCTION ON SOFT SOILS

TREGUB O.V.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOVALOV V.V.², *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
LANDO Yev.O.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOCHAN S.M.⁴, *Ass.*,
ANDREIEVA I.G.⁵, *Ass.*

^{1*} Department of Highways, Geodesy and Land 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, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

² Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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, e-mail: kovalov.viacheslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6731-4192

³ Department of Highways, Geodesy and Land 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, e-mail: lando.evgen@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2608-931X

⁴ Department of Highways, Geodesy and Land 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, e-mail: kochan.sergii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9099-0399

⁵ Department of Highways, Geodesy and Land 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, e-mail: andreieva.iryana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7083-8955

Abstract. Problem statement. Ensuring the bearing capacity of bases is a pressing issue in the construction of roads and artificial structures on soft soils. The method of preloading the base ensures the strengthening of soft soils. However, the calculation and design methodology for the roadbed, taking into account the specific features of its interaction with the soil base during construction, requires improvement. The **purpose of the research** is to improve the methodology of numerical modeling using the finite element method (FEM) for the stress-strain state (SSS) of road embankments during construction on soft soils, taking into account their precompression. **Research Results.** The reliability of soil models was assessed through test numerical modeling of field tests on foundations using the ideal elastic-plastic model with the Mohr-Coulomb strength criterion and the Hardening Soil model, utilizing the PLAXIS 3D software. The study considered tasks such as modeling the stress-strain state (SSS) during loading and partial unloading (precompression effect) of a soft soil layer during the construction of a road embankment, determining the time required for settlement stabilization, modeling the SSS during the compaction of soft soil with vertical sand drains and a filtration layer, and modeling the embankment on a sand cushion. Based on the numerical modeling results, the dimensions of the strengthening and plastic deformation zones in the base and the allowable pressure for soil improvement were determined. The consolidation time of the soil and settlement stabilization of the foundation were calculated based on the dissipation of excess pore pressure in the soft water-saturated soil layer. The stability of the embankment slopes was checked by calculating the "safety factors". **Conclusions.** For modeling the FEM SSS of foundations under loading and partial unloading (precompression effect) of a soft soil layer during the construction of a road embankment, the use of an elastic-plastic isotropic hardening model is advisable. The application of the preload method using a filtering embankment with vertical drains will strengthen the soft soils and increase the bearing capacity of the foundation in a short period, allowing the road to be used without significant additional deformations, thus enhancing its reliability during operation. The proposed method of numerical modeling FEM SSS can be applied in the design of structures on soft soils, which involves the calculation of settlements and stresses, excess pore pressure, consolidation time, analysis of plastic deformation zones, soil strengthening and stability.

Keywords: numerical modeling; soft soils; road embankment; precompression of soils; highway

Постановка проблеми. Забезпечення несучої здатності основ є актуальною проблемою при будівництві автомобільних доріг та штучних споруд на слабких ґрунтах. Слабкі ґрунти характеризуються високою стисливістю, що зумовлена

значенням модуля загальної деформації $E < 5 \text{ МПа}$ та коефіцієнтом водонасичення $S_r \geq 0,8$. До таких ґрунтів належать водонасичені мулисті супіски, суглинки, глини, сапропелі, торфи, заторфовані і лесові насичені водою ґрунти та ін. [1].

Як правило, проектне рішення на ділянці залягання слабких ґрунтів передбачає: видалення та заміну шару слабого ґрунту; спорудження естакад; використання слабого ґрунту у якості основи із застосуванням заходів, що забезпечують ущільнення і зміцнення та прискорення процесу консолідації ґрунтів.

Проектні рішення приймають на основі техніко-економічного порівняння варіантів з урахуванням: категорії автомобільної дороги; необхідної висоти земляного полотна; особливостей будови слабкої ґрунтової товщі; умов виконання робіт й термінів завершення будівництва та ін.

З метою підвищення несучої здатності та зменшення деформативності слабких ґрунтів застосовують метод передбудівельного ущільнення основ поверхневим привантаженням, проектування якого передбачає визначення розмірів шару насипу й часу необхідного для досягнення заданого ступеню консолідації ґрунтів.

Використання слабого ґрунту у якості основи без його заміни подушкою суттєво знижує вартість та трудомісткість робіт, підвищує темпи будівництва. Однак необхідно враховувати стійкість, кінцеві величини та час стабілізації осідання слабкої ґрунтової товщі при спорудженні на ній земляного полотна автодороги.

Важливим завданням є удосконалення методики чисельного моделювання, визначення моделей ґрунтів здатних розраховувати НДС при вирішенні вказаних задач з урахуванням процесів консолідації, часу стабілізації осідань та ін.

Виділення невідомої проблеми.

У практиці будівництва для покращення фізико-механічних властивостей ґрунтів використовують наступні технології: глибинне ущільнення ґрунтовими палями, поверхнєве ущільнення важкими трамбівками, заміна слабого шару подушкою, армування, цементация, силікатизация, попереднє (передбудівельне) ущільнення тощо. Метод передбудівельного ущільнення основи фільтруючим поверхневим привантаженням не вимагає

значних витрат у порівнянні з вище зазначеними методами. У процесі привантаження відбувається усестороннє обтиснення ґрунту, що сприяє витисканню води із пор і ущільненню ґрунту. Але при швидкому навантаженні без урахування консолідації відбуваються зрушення та витискання шару слабого ґрунту із-під основи споруди. Невідомою є величина попереднього привантаження, що необхідне для достатнього ущільнення і зміцнення ґрунту. Необхідна методика визначення допустимого тиску при попередньому обтисненні слабкої основи.

Аналітичні методи дозволяють визначити осідання при первинному завантаженні [1; 2; 9]. Такі розрахунки завищують пружні деформації і не враховують осідання попередніх стадій навантаження основи. Чисельне моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) дає можливість виконувати розрахунки з урахуванням впливу попередніх стадій навантаження на подальші деформації основи [11].

Методом скінченних елементів виконують розрахунки деформацій слабких ґрунтів та часу їх стабілізації з використанням моделей, що враховують первинну та вторинну консолідацію, повзучість ґрунтів. У програмному комплексі PLAXIS є можливим моделювання: вихідного природного напружено-деформованого стану (НДС) основи, попереднього привантаження ґрунтових шарів, розвантаження і прикладення навантажень від споруди та ін.

Моделі ґрунтів враховують пружно-пластичні, пружно-в'язко-пластичні деформації, однак їх використання у практиці проектування все ще стримується у зв'язку із труднощами визначення розрахункових параметрів.

Мета досліджень – удосконалення методики чисельного моделювання МСЕ НДС земляного полотна автомобільної дороги у процесі спорудження на слабких ґрунтах; визначення допустимого тиску при попередньому обтисненні слабкої основи; оцінка адекватності моделей ґрунту при

визначенні НДС основи споруди з урахуванням попереднього тимчасового привантаження задля ущільнення та зміцнення ґрунту.

Аналіз досліджень і публікацій.

Питанням розрахунків та проєктуванню споруд на слабких ґрунтах присвячені дослідження вітчизняних та закордонних науковців: І. П. Бойко, Ю. Л. Винников, М. Ф. Друкований, М. Л. Зоценко, С. М. Клепиков, М. В. Корнієнко, В. І. Крисан, Ю. О. Кірічек, В. О. Сахаров, О. В. Самородов, В. Л. Сєдін, Ю. Ф. Тугаєнко, В. Б. Швець, В. С. Шокарєв, Braja M. D., Khaled Sobhan, T. Schanz, P. A. Vermeer та ін. [3–8; 10; 11].

Згідно з ДСТУ [2] рекомендується ущільнення слабких ґрунтів тимчасовим чи постійним привантаженням насипним ґрунтом, у тому числі із улаштуванням фільтруючого шару чи дрени за необхідності прискорення процесу консолідації основи. У якості альтернативного рішення слід розглядати заміну шарів слабких ґрунтів на піщані, гравійні та ін. подушки.

Бража М. Д. зазначає [8], що для зменшення деформативності слабких ґрунтів є ефективним їх передбудівельне тимчасове привантаження. Враховується тиск від споруди $\Delta\sigma_{(p)}$ та додаткове навантаження $\Delta\sigma_{(f)}$ шару слабого ґрунту. Осідання слабого шару ґрунту потужністю H за рахунок первинної фільтраційної консолідації при навантаженні $\Delta\sigma_{(p)} + \Delta\sigma_{(f)}$ визначається за формулою [8]:

$$S_{(p+f)} = \frac{c_c H}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_0 + [\Delta\sigma_{(p)} + \Delta\sigma_{(f)}]}{\sigma'_0}.$$

Ступінь консолідації визначається за виразом:

$$U = \frac{\log \left[\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma_{(p)}}{\sigma'_0} \right]}{\log \left[\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma_{(p)} + \Delta\sigma_{(f)}}{\sigma'_0} \right]}.$$

Метод ущільнення слабких водонасичених ґрунтів до початку будівництва є доцільним при стисливих основах потужністю понад 3 м. Кінцеве

осідання шару ґрунту потужністю H під дією рівномірно розподіленого навантаження P_I від ваги насипу висотою h визначається за формулою [2]:

$$S = H m_v p_{II},$$

де m_v – коефіцієнт відносної стисливості ґрунту слабого шару, кПа^{-1} ; p_{II} – тиск від ваги насипу.

Осідання шару ґрунту кінцевої товщини S_t у момент часу t визначається за формулою:

$$S_t = SQ,$$

де S – кінцеве осідання шару слабого ґрунту, см; Q – ступінь консолідації (ущільнення) шару слабого ґрунту.

Відповідно до теорії ступінь фільтраційної консолідації Q пов'язаний зі значенням N :

$$N = \pi^2 c_v t / (4h^2).$$

Звідси час:

$$t = 4h^2 N / (\pi^2 c_v),$$

де c_v – коефіцієнт консолідації:

$$c_v = k_f / (m_v \gamma_w),$$

де k_f – коефіцієнт фільтрації ґрунту см/рік; γ_w – питома вага води.

Для одомірної задачі ущільнення епюра напружень, що ущільнює основу приймається у вигляді прямокутника.

При призначенні тиску на основу складену слабкими ґрунтами та швидкості його прикладення рекомендується враховувати величини їх структурної міцності [2].

Для моделювання НДС у процесі спорудження земляного полотна з урахуванням попереднього обтиснення основи складеної слабкими ґрунтами (консолідації та зміцнення) є ефективним використання геотехнічного програмного комплексу PLAXIS [10; 11].

Оцінювання достовірності моделей ґрунтів. Для оцінювання достовірності моделей ґрунтів щодо прогнозування

осідань проведені тестові чисельні моделювання МСЕ у програмі PLAXIS 3D натурних випробувань ґрунтової основи.

При чисельному моделюванні використані ідеальна пружно-пластична модель ґрунту з критерієм міцності Мора-Кулона (*Mohr-Coulomb* – далі скор. *МС*) та модель зміцнення ґрунту (*Hardening Soil*, далі скор. – *HS*).

Вихідними параметрами до моделі *МС* є фізико-механічні характеристики ґрунтів, які визначають стандартними методами випробування.

Для моделювання НДС за моделлю *HS* використовують характеристики жорсткості ґрунту: модуль деформації E_{50}^{ref} , який визначають для 50% рівня навантаження від граничного; E_{oed}^{ref} – компресійний модуль при навантаженні; E_{ur}^{ref} – модуль при розвантаженні; m – показник ступеневої залежності жорсткості ґрунту від рівня напружень. На відміну від моделі *МС*, модель зміцнення ґрунту *HS* урахує залежність модулів жорсткості від напруження. Усі модулі жорсткості зростають із тиском.

На першому етапі розрахунку за моделлю *HS* прийняті модулі ґрунту, що розраховані у програмі зі співвідношень:

$$E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}, E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{50}^{ref} \quad (1)$$

На другому етапі розрахунку з метою спроби підвищити точність прогнозування осідання за моделлю *HS* використано компресійний модуль деформацій, який розраховано за формулою:

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)}, \quad (2)$$

де E – штамповий модуль деформації, ν – коефіцієнт Пуассона ґрунту.

1) Для першого тестового чисельного моделювання вхідні дані прийняті за результатами випробувань основи дослідним фундаментом розмірами у плані $1,4 \times 1,6$ м при складному режимі навантаження [6]. Ґрунт – суглинок з наступними фізико-механічними характеристиками: питома вага $\gamma = 18,7$ кН/м³; коефіцієнт пористості

$e = 0,75$; кут внутрішнього тертя $\varphi = 23^\circ$; питоме зчеплення $c = 43$ кН/м². За графіком осідання визначено модуль деформації основи $E = 19$ МПа. Граничний опір основи $P_u = 1,09$ МПа. $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref} = 19$ МПа, $E_{ur}^{ref} = 3 \cdot E_{50}^{ref} = 57$ МПа.

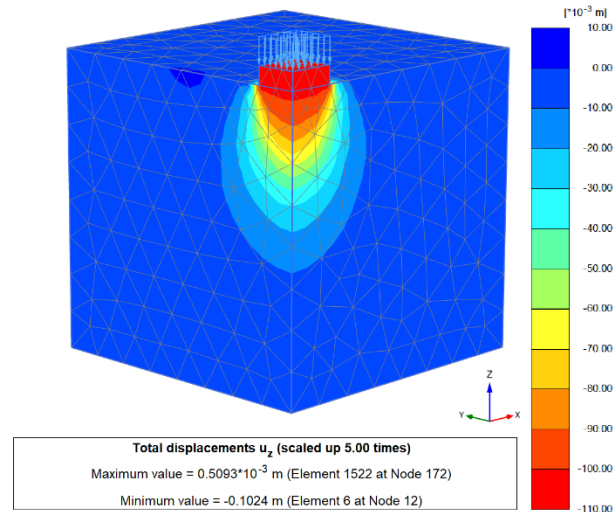


Рис. 1. Чисельне моделювання осідання дослідного фундаменту на основі із суглинка

У результаті зіставлення чисельного розрахунку осідань з даними випробування ґрунту дослідним фундаментом визначене наступне. При навантаженнях, що перевищують пружну стадію (приблизно лінійний діапазон у залежності $S-P$) роботи ґрунту за обома моделями зафіксовані зниження модулів деформації та розвиток пластичних деформацій в основі. За моделлю *HS* отримані дещо більші значення розрахункових осідань фундаменту у порівнянні з натурними даними (розбіжність 5–56 %) та менші значення осідань – за моделлю *МС* (розбіжність 22–37 %). При розвантаженні ґрунту модель *МС* показала значно завищені значення пружних (відновлюваних) деформацій – відхилення до 80 %. Втрата несучої здатності основи – при тиску 0,82 МПа.

Результати чисельного моделювання з використанням модулів жорсткості ґрунту за співвідношенням (1) продемонстрували незадовільну збіжність розрахункових і експериментальних значень осідань фундаменту. Уточненим розрахунком за моделлю *HS* з використанням модуля E_{oed} ,

що визначений за рівнянням (2) ($E_{oed}^{ref} = 30,5$ МПа), це забезпечило збіжність значень за гілкою навантаження (до 12 %) у діапазоні до $0,75 P_u$ (див. крива № 4 HS-2 на рис. 2). За гілкою розвантаження модель HS показала задовільну збіжність. Рекомендується приймати модулі жорсткості за результатами випробувань ґрунту методами компресійного та тривісного стискання.

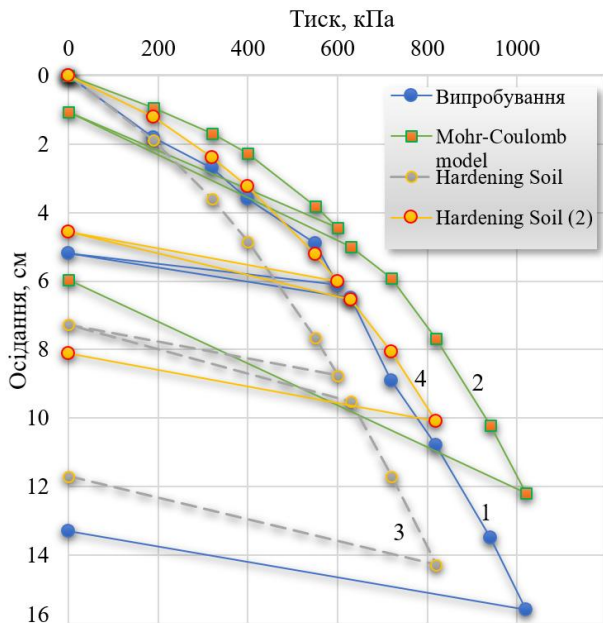


Рис. 2. Зіставлення результатів чисельного розрахунку осідань з випробуваннями дослідним фундаментом основи із суглинку

2) Для другого тестового чисельного моделювання використано результати випробувань основи дослідним фундаментом з розмірами у плані $1,0 \times 1,0$ м, глибиною закладання $d = 0,8$ м. Досліди проведені під керівництвом проф. Ю. Ф. Тугаєнко. Ґрунт – глина з наступними фізико-механічними характеристиками: $\varphi = 14,8^\circ$; $c = 38$ кПа; $E = 4,8$ МПа; $\gamma = 17,95$ кН/м³; $e = 1,0$ [7].

У результаті зіставлення чисельного розрахунку за моделлю HS отримані більші значення прогнозованих осідань основи у порівнянні з натурними даними (розбіжність 17–51 %) та менші значення осідань – за моделлю MC (розбіжність 3–41 %).

До переваг пружно-пластичної моделі слід віднести використання стандартних механічних параметрів ґрунтів. Однак ця

модель не враховує зміцнення ґрунту при навантаженні, а при розвантаженні пружні деформації, як правило, значно перевищують натурні дані. Для моделювання НДС основ при їх попередньому обтисненні є доцільним використання моделі HS.

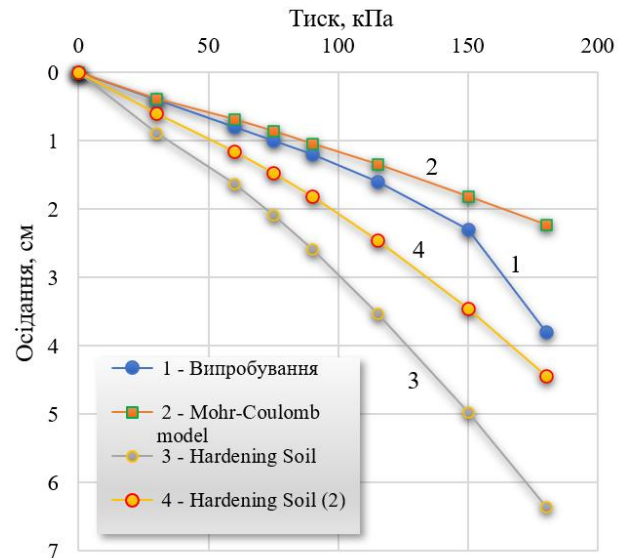


Рис. 3. Зіставлення результатів чисельного моделювання осідань з випробуваннями дослідним фундаментом основи із глини

Чисельне моделювання НДС земляного полотна автомобільної дороги у процесі спорудження на слабких ґрунтах. Для вирішення поставленого завдання і з метою пошуку альтернативних рішень у роботі виконане чисельне моделювання МСЕ НДС земляного полотна автомобільної дороги у процесі спорудження на слабких ґрунтах з використанням програмного комплексу PLAXIS за моделями MC та HS.

У дослідженні розглянуті наступні задачі:

- моделювання НДС основи при навантаженні та частковому розвантаженні (ефект передбудівельного обтиснення) шару слабого ґрунту у процесі спорудження земляного полотна автодороги; визначення часу стабілізації осідань;

- моделювання НДС основи при ущільненні шару слабого ґрунту з вертикальними піщаними дренами, що об'єднані по верху фільтраційним шаром, у

процесі спорудження земляного полотна;
визначення часу стабілізації осідань;

- моделювання НДС при спорудженні земляного полотна на піщаній подушці, улаштований шляхом часткової заміни шару слабого ґрунту.



Рис. 4. BIM-модель автомобільної дороги Іб категорії

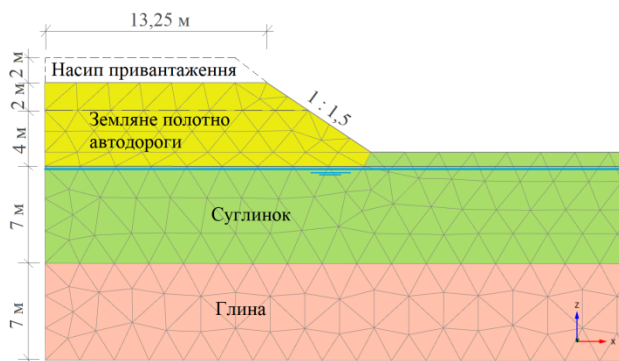


Рис. 5. Розрахункова модель МСЕ

Виконане моделювання земляного полотна автомобільної дороги Іб технічної категорії (рис. 4), що споруджується із супіску на слабкому ґрунті – водонасичений суглинок текучопластичної консистенції потужністю 7,0 м, який підстиляється шаром м'якопластичної глини (рис. 5).

Нижня частина насипу $h = 0,5$ м моделюється із добре фільтруючого матеріалу ($k = 1,0$ м/добу). Рівень ґрунтових вод – на 1 м нижче поверхні.

У результаті чисельного моделювання МСЕ визначені НДС земляного полотна, час консолідації шару слабого ґрунту, області пластичних деформацій та зміцнення ґрунту, допустимі тиски, стійкість укосів за коефіцієнтом безпеки.

Розрахунок за ідеальною пружно-пластичною моделлю з критерієм міцності Мора-Кулона.

Використання ідеальної пружно-пластичної моделі з критерієм міцності Мора-Кулона за умови недренованої поведінки ґрунту з певним припущенням дозволяє урахувати первинну фільтраційну консолідацію, за якої відбувається найбільший розвиток осідань у часі.

Моделювання спорудження земляного полотна автомобільної дороги на слабкому ґрунті з урахуванням попереднього тимчасового привантаження включало наступні етапи:

- зведення земляного полотна висотою 4,0 м на слабкому ґрунті упродовж 20 діб;
- технологічна перерва (витримування привантаження) – 30 діб;
- відсіпання земляного полотна висотою 2 м та тимчасового насипу привантаження – 2 м, упродовж 10 діб;
- витримування попереднього привантаження задля консолідації ґрунту, що визначається за умовою розсіювання надлишкового порового тиску у шарі слабого ґрунту до значення 20 кПа;
- часткове розвантаження основи – видалення насипу привантаження висотою 2,0 м.

У програмі PLAXIS виконане моделювання ґрунтової основи та насипу, введені параметри ґрунтів (табл. 1), граничні умови, стадії будівництва, згенерована сітка скінченних елементів.

Шари суглинку та глини є недренованими, що призведе до зростання надлишкового порового тиску під час спорудження насипу. Час необхідний на стабілізацію осідань розраховувався із умови розсіювання надлишкового порового тиску у ґрунті до значення 20 кПа.

Таблиця 1

Основні параметри до розрахунку основи за ідеальною пружно-пластичною моделлю з критерієм міцності Мора-Кулона

Параметри	Супісок	Суглинок	Глина
Модель ґрунту	Mohr-Coulumb		
Тип поведінки	Дрен.	Не дрен.	Не дрен.
Питома вага ґрунту, γ_{unsat} , кН/м ³	17,4	15,5	16,5
Питома вага водонасиченого ґрунту, γ_{sat} , кН/м ³	19,6	17,6	18,5
Коефіцієнт фільтрації, k , м/добу	0,5	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Модуль деформації, E_{ref} , кН/м ²	28 000	5 000	17 500
Коефіцієнт Пуассона, ν	0,3	0,35	0,35
Питоме зчеплення, c_{ref} , кН/м ²	13	12	35
Кут внутрішнього тертя, ϕ , град.	25	22	20

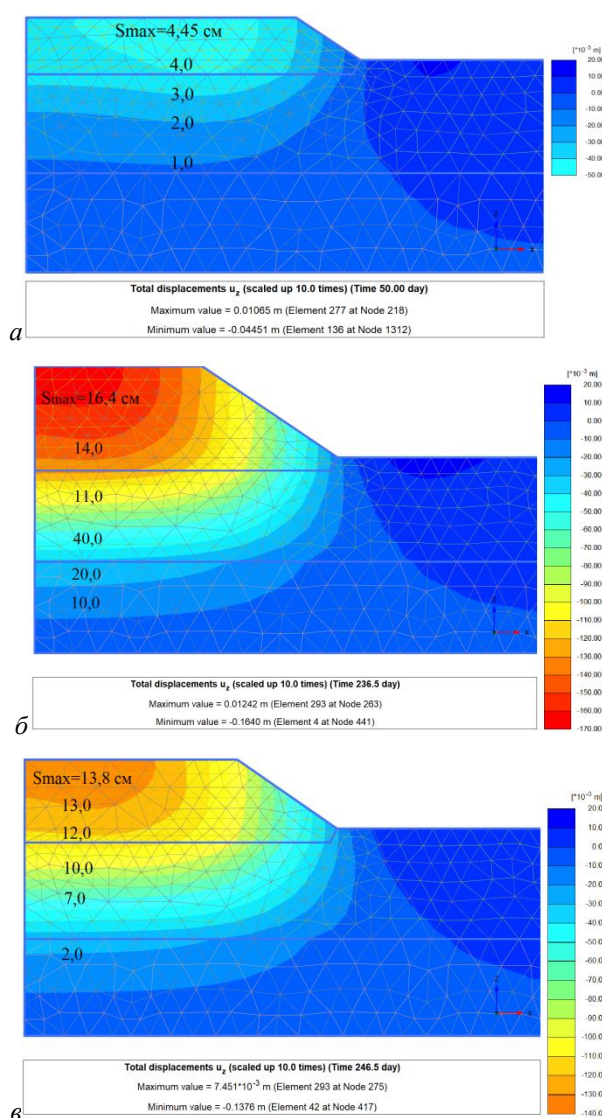


Рис. 6. Вертикальні деформації моделі на різних етапах спорудження земляного полотна:

а – завершення 2-го етапу (найбільші вертикальні деформації $S_{max} = 4,45$ см); **б** – завершення 4-го етапу ($S_{max} = 16,4$ см); **в** – після часткового розвантаження – 5 етап ($S = 13,8$ см)

За результатами чисельного моделювання – осідання земляного полотна після завершення 2-го етапу склало 4,45 см, а після 4-го етапу – 16,4 см. Після часткового розвантаження (5 етап) за рахунок пружних деформацій відбувся певний підйом основи, незворотні деформації земляного полотна склали 13,8 см (рис. 6).

У процесі консолідації розсіювання додаткового порового тиску у ґрунті до 20 кПа відбулось через 237 діб (рис. 7).

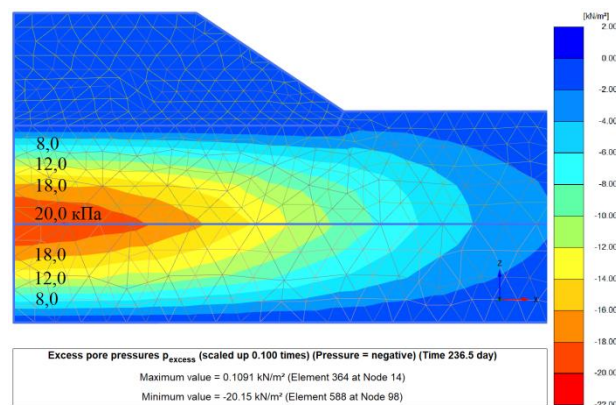


Рис. 7. Розсіювання надлишкового порового тиску в основі земляного полотна

У результаті чисельного моделювання НДС МСЕ при застосуванні моделі МС отримано, що умовна стабілізація осідань та пов'язане з цим завершення спорудження земляного полотна дороги відбудеться через 8 міс.

Розрахунок за моделлю Hardening Soil.

Для моделювання НДС з урахуванням зміцнення шару слабого ґрунту у процесі навантаження основи використано модель

HS, у якій реалізовані зміцнення при параметри до розрахунку наведені зрушенні та стисненні [11]. Основні в таблиці 2.

Таблиця 2

Основні параметри до розрахунку з урахуванням зміцнення ґрунтів основи

Параметри	Супісок	Суглинок	Глина
Модель ґрунту	Mouhr-Coulumn	Hardening Soil	Hardening Soil
Тип поведінки	Дрен.	Не дрен.	Не дрен.
Питома вага ґрунту, γ_{unsat} , кН/м ³	17,4	15,5	16,5
Модулі жорсткості, кН/м ²	E_{50}^{ref} E_{oed}^{ref} E_{ur}^{ref}	5 000 8 025 15 000	17 500 17 500 52 500
Коефіцієнти Пуассона, ν	0,3	0,35	0,35
ν_{ur}	—	0,2	0,2
Питоме зчеплення, c_{ref} , кН/м ²	13	12	35
Кут внутрішнього тертя, ϕ , град.	25	22	20
m	—	0,5	0,5

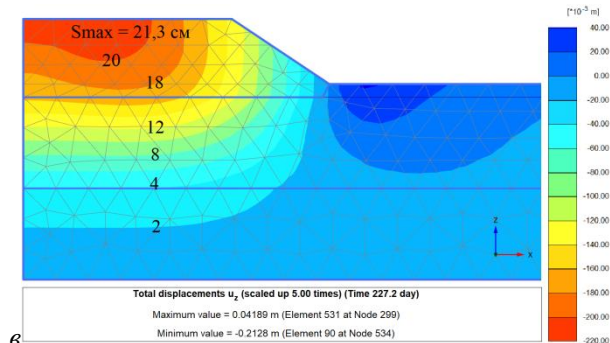
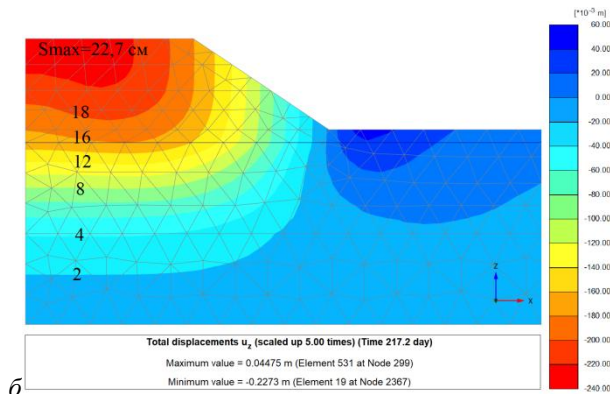
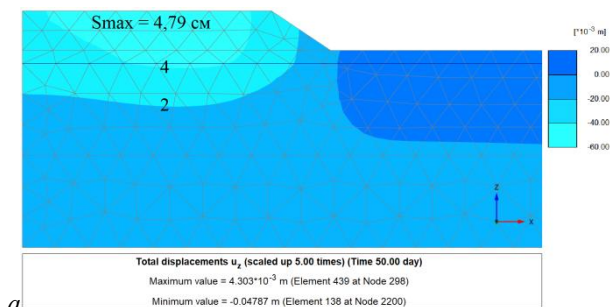


Рис. 8. Вертикальні деформації моделі на різних етапах спорудження земляного полотна:
а – завершення 2-го етапу (найбільші вертикальні деформації $S_{max} = 4,79$ см); б – завершення 4-го етапу ($S_{max} = 22,7$ см); в – після часткового розвантаження – 5 етап ($S_{max} = 21,3$ см)

За результатами чисельного моделювання – осідання земляного полотна після завершення 2-го етапу склало 4,79 см, а після 4-го етапу – 22,7 см (рис. 8).

Після часткового розвантаження (5 етап – видалення насипу привантаження) невідновлювальні вертикальні деформації земляного полотна склали 21,3 см, тобто пружна складова – 1,4 см, що у порівнянні з моделлю МС менше на 86 %.

Проаналізувавши результати розрахунку за моделлю HS встановлено, що до тиску на основу 90 кН/м² відбувається ущільнення і зміцнення шару слабого ґрунту – водонасиченого суглинка. При збільшенні навантаження об'єм зміцненого ґрунту в основі досягає підстиляючого шару – глини, про що свідчать точки зміцнення під завантаженою площею (рис. 9).

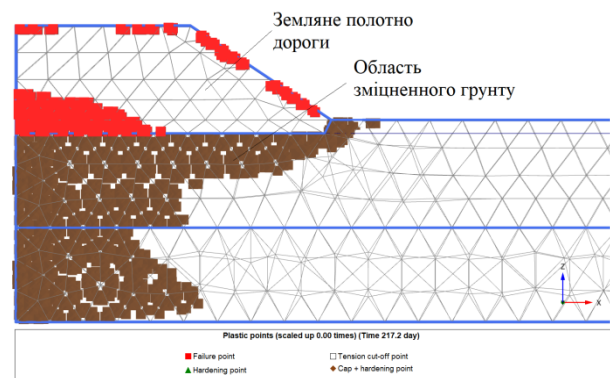


Рис. 9. Области зміцнення та пластичних деформацій у ґрунті

Чисельне моделювання МСЕ дозволило проаналізувати зони зміцнення і пластичних деформацій в основі та визначити значення

тиску, яке буде ефективним для ущільнення і зміцнення ґрунту. При тиску від насипу до 130–140 кН/м² в основі відбувається зміцнення ґрунту.

Розсіювання надлишкового порового тиску та консолідація ґрунту і умовна стабілізація осідання за моделлю *HS* відбулись через 7,5 міс. при осіданні земляного полотна $S = 22,7$ см (рис. 10).

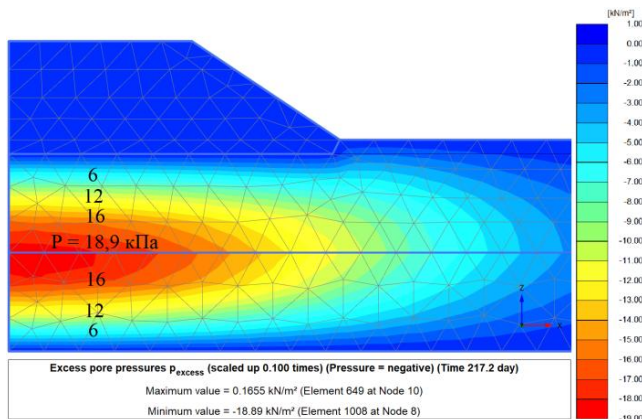


Рис. 10. Розсіювання надлишкового порового тиску в основі земляного полотна

Після розвантаження за рахунок пружних (відновлювальних) деформацій ґрунту кінцеві значення осідання насипу склали 21,3 см.

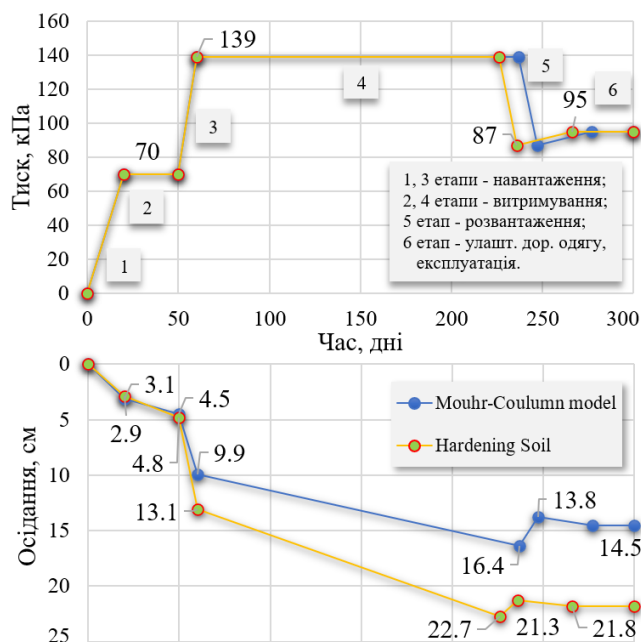


Рис. 11. Графік осідань земляного полотна дороги в процесі спорудження за результатами чисельного розрахунку МСЕ

На рисунку 11 наведено графік осідань земляного полотна дороги у процесі його

спорудження за результатами чисельного розрахунку з використанням моделей *MC* та *HS*.

Згідно із аналітичним розрахунком за ДСТУ [1] кінцеве осідання основи склало $S_{\text{кінц}} = 19$ см. Час осідання основи при ступеню консолідації 70 % становить $t = 0,36$ року, а при 95 % – $t = 1,01$ року.

На ефективність ущільнення основи впливають фільтраційні та деформаційні властивості ґрунтів, інтенсивність та час поверхневого привантаження.

При проєктуванні земляного полотна необхідно визначати стійкість основи та укосів насипу у процесі спорудження та після стабілізації деформацій. У програмі PLAXIS стійкість оцінювалась за «коефіцієнтом безпеки», який визначається за даними чисельного моделювання напружено-деформованого стану з урахуванням зниження параметрів міцності ґрунтів. Коефіцієнт безпеки з умовою міцності Кулона визначається за виразом:

$$k_{\text{safety}} = \frac{\sigma_n \cdot \text{tg} \varphi + c}{\sigma_n \cdot \text{tg} \varphi_r + c_r},$$

де σ_n – нормальне напруження; c_r і φ_r – знижені значення питомого зчеплення та куту внутрішнього тертя, достатні для забезпечення рівноваги.

У результаті чисельного моделювання МСЕ визначено, що стійкість укосів земляного полотна забезпечена. Коефіцієнт безпеки становить $k = 1,74$ (рис. 12).

При моделюванні насипу оцінювалась небезпека випору слабого ґрунту. Ознакою втрати стійкості основи є розвиток зон граничної рівноваги, де спротив ґрунту зрушенню нижче величини небезпечних дотичних напружень. Такі зони при чисельному моделюванні аналізувались за точками пластичних деформацій у ґрунті. Втрати несучої здатності у процесі розрахунку не відбулось. Стійкість основи споруди забезпечена.

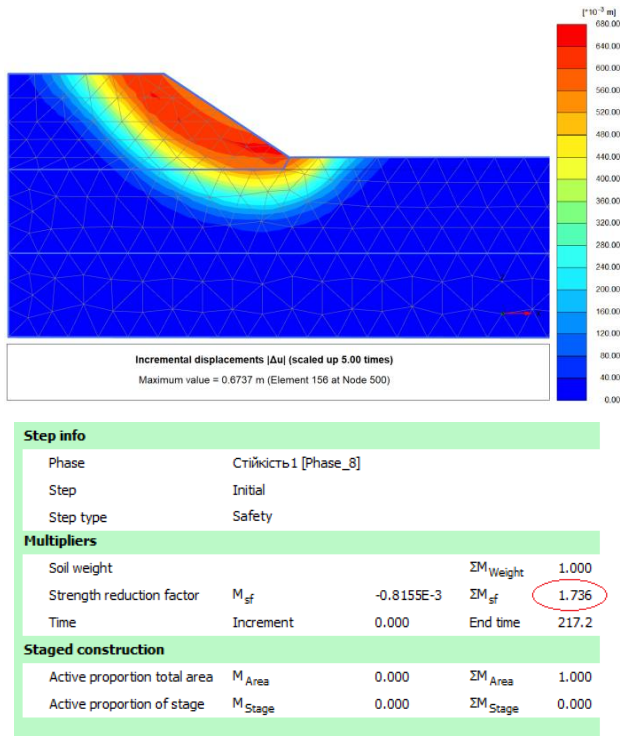


Рис. 12. Результати розрахунку стійкості укосу насипу

Розрахунок НДС земляного полотна на слабкій основі з вертикальними дренами.

Час стабілізації осідань може бути вирішальним фактором при обґрунтуванні доцільності застосування методу ущільнення слабкої ґрунтової основи попереднім привантаженням. Згідно із ДСТУ [2] рекомендується для зменшення відстані руху води, що витискається з ґрунту, влаштовувати вертикальні дрени із крупного чи середньої крупності піску, а по верху дрени поєднувати фільтруючим шаром.

У якості альтернативного рішення виконано розрахунок за моделлю HS НДС земляного полотна на слабкій основі з вертикальними піщаними дренами, що улаштовані з кроком 3,0 м і пронизують всю товщу слабого ґрунту $H_d = 7$ м. Дрени об'єднані по верху фільтраційним шаром товщиною 1 м із крупнозернистого піску.

При тисках 70–100 кН/м² в основі насипу зафіксовано формування областей зміцнення ґрунту між дренами. Після перевищення вертикальними напруженнями значень 100–110 кН/м² відбуваються деформації підстиляючого шару глини вже зміцненим масивом суглинку.

Розсіювання надлишкового порового тиску та консолідація шарів суглинку і глини відбулись через 3,5 міс. при осіданні земляного полотна $S = 17,3$ см (рис. 13).

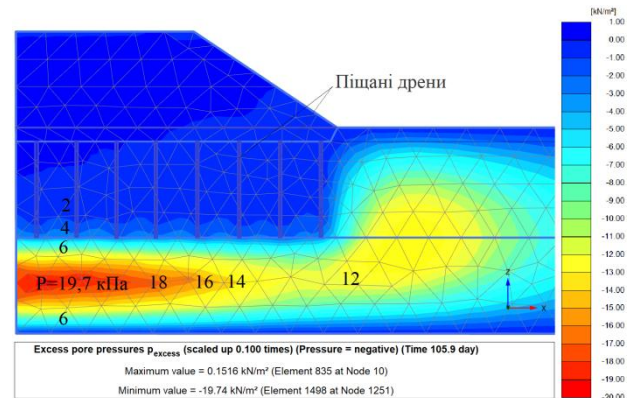


Рис. 13. Розсіювання надлишкового порового тиску в основі з вертикальними дренами

Аналітичним розрахунком за ДСТУ [2] при величині ступеню консолідації $Q_r = 0,9$ визначено час консолідації шару слабого ґрунту, який залежить від наступних факторів:

$$c_v \cdot \frac{t}{\ln \left[\frac{1}{1 - Q_r} \right]} = 55 \cdot \frac{1}{\ln \left[\frac{1}{1 - 0,9} \right]} = 23,9$$

$$T_{v2} = \frac{c_v t}{h^2} = \frac{23,9 \cdot 0,3}{7^2} = 0,146.$$

Залежність ступеню консолідації від факторів часу: при $T_{v1} = 0,098$, $Q_{v1} = 0,32$; при $T_{v2} = 0,146$, $Q_{v1} = 0,39$. Співвідношення діаметру дрени до діаметру зони її ефективного впливу:

$$v = d_e / d_w = 3 / 0,5 = 6,0.$$

Визначено, що при $Tr = 0,2$ $Q_r = 0,777$; при $Tr = 0,3$ $Q_r = 0,890$ [2].

Величина ступеню консолідації:

$$Q_{r,v1} = 1 - (1 - Q_r) \cdot (1 - Q_v) = 1 - (1 - 0,777) \cdot (1 - 0,32) = 0,848 ,$$

$$Q_{r,v2} = 1 - (1 - 0,890) \cdot (1 - 0,39) = 0,933,$$

$$t = t_1 + (t_1 - t_2) \cdot \frac{Q_r - Q_{r,v1}}{Q_{r,v2} - Q_{r,v1}} = 0,2 + (0,3 - 0,2) \cdot \frac{(0,9 - 0,848)}{(0,933 - 0,848)} = 0,184 \text{ року}$$

Розрахунковий час консолідації шару слабого ґрунту – суглинку, склав 67 діб. Чисельним моделюванням урахована не лише консолідація суглинку, а і підстиляючого шару – глини, тому часу знадобилось більше.

Таким чином, улаштування вертикальних дренаж дозволяє суттєво скоротити час консолідації слабого ґрунту, що залежить від фільтраційних властивостей ґрунту та ефективності дренажної системи. У розглянутих умовах час консолідації ґрунту за рахунок роботи вертикальних дренаж скоротився у 2 рази.

Розрахунок НДС земляного полотна на піщаній подушці.

У якості альтернативного рішення розглянуто варіант часткової заміни слабого шару подушкою товщиною 3,0 м із піску середньої крупності з характеристиками: $E = 20$ МПа; $\nu = 0,3$; $\varphi = 37^\circ$, $c = 0$ кПа; $\psi = 0^\circ$; $\gamma = 17$ кН/м³; $k = 1,2$ м/добу.

За даними чисельного розрахунку за моделлю HS після завершення спорудження першої частини земляного полотна на піщаній подушці загальні вертикальні деформації склали 4,8 см, а після спорудження другої частини земполотна та відсіпання шару тимчасового привантаження – 17,3 см (рис. 14).

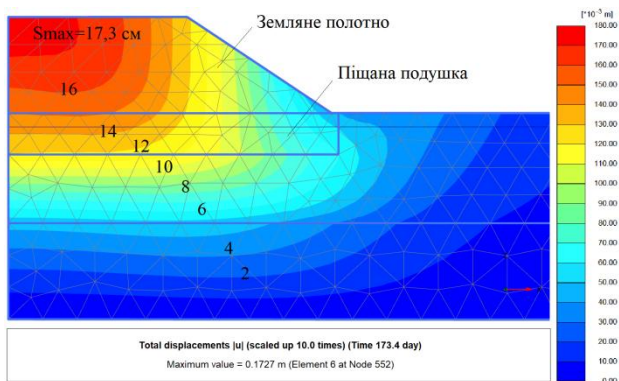


Рис. 14. Загальні деформації земляного полотна на піщаній подушці ($S_{max} = 17,3$ см)

Розсіювання надлишкового порового тиску та консолідація шарів суглинку і глини відбулись через 5,8 міс. (рис. 15).

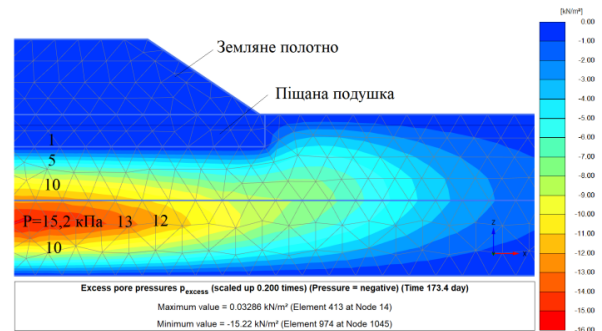


Рис. 15. Розсіювання надлишкового порового тиску в основі земляного полотна на піщаній подушці

На рисунку 16 наведено графік осідань земляного полотна дороги на слабкій основі з вертикальними дренажами та на піщаній подушці за результатами чисельного розрахунку.

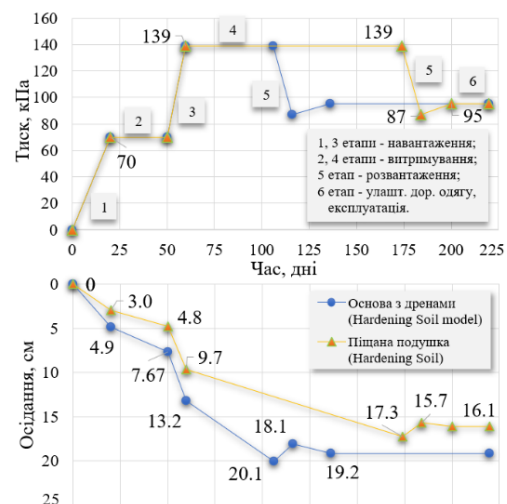


Рис. 16. Графік осідань земляного полотна дороги у процесі спорудження на слабкій основі з вертикальними дренажами та на піщаній подушці за результатами чисельного розрахунку MSE

Порівнявши графіки осідань земляного полотна дороги у часі (див. рис. 11, 16) можливо зробити висновок, що привантаження слабкої основи фільтруючим насипом з вертикальними дренажами є більш ефективним у порівнянні з іншими розглянутими варіантами. Улаштування піщаної подушки, як правило, є економічно доцільним при незначній її товщині та потужності слабого шару.

Після умовної стабілізації осідань (консолідація від 80 до 90 %) допускається улаштування дорожнього одягу та експлуатація автодороги [1].

Висновки

Для моделювання МСЕ НДС основ при навантаженні та частковому розвантаженні (ефект попереднього обтиснення) шару слабого ґрунту у процесі спорудження земляного полотна автодороги є доцільним використання пружно-пластичної моделі ізотропного зміцнення.

Застосування методу привантаження фільтруючим насипом з улаштуванням вертикальних дренажів забезпечить зміцнення слабких ґрунтів та підвищення несучої

здатності основи у короткі терміни, що дозволить експлуатувати автодорогу без значних додаткових деформацій, тим самим підвищити її надійність в експлуатації.

Розглянута методика чисельного моделювання МСЕ НДС може бути використана при проєктуванні споруд на слабких ґрунтах, що передбачає розрахунки осідань і напружень, надлишкового порового тиску, часу консолідації, аналіз зон пластичних деформацій, зміцнення ґрунту і стійкості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 9186:2022. Настанова з проєктування земляного полотна автомобільних доріг. [Чинний від 2023-02-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 114 с.
2. ДСТУ-Н Б.В. 1.1.-40:2016. Настанова щодо проєктування будівель і споруд на слабких ґрунтах. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. 66 с.
3. Друкований М. Ф. та ін. Армування основ будівель і споруд : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. 235 с.
4. Zotsenko N., Vynnykov Y. Designing the compacted subsoil's using mathematical simulation method. *Proceedings of the XIII Danube-European Conference on Geotechnical Engineering* (Ljubljana, 2006). № 2. Pp. 385–390.
5. Киричек Ю. А., Трегуб А. В., Тымчишин Е. М. Определение допускаемого давления на основания фундаментов мелкого заложения по данным численного упругопластического решения. *Науково-технічний збірник: Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ : НТУ, 2013. Вип. 89. С. 177–184.
6. Клепиков С. Н. Расчет сооружений на деформируемом основании. Київ : НИИСК, 1996. С. 60–85.
7. Тугаенко Ю. Ф. Развитие деформаций в основаниях фундаментов, способы их ограничения и методы оценки. Монография. Одесса : Астропринт, 2003. С. 112–114.
8. Braja M. Das, Khaled Sobhan. *Principles of Geotechnical Engineering*. Eighth Edition, SI – Cengage Learning, 2014. 770 p.
9. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. [Чинний від 2019-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. 36 с.
10. Brinkgreve R. B. J. & Vermeer P. A. PLAXIS : Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, Version 7. Balkema, 1998.
11. Schanz T., Vermeer P. A. The Hardening Soil Model : Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Balkema. Rotterdam, 1999. № 1. Pp. 281–290.

REFERENCES

1. DSTU 9186:2022. *Nastanova z proyektuvannya zemlyanoho polotna avtomobil'nykh dorih*. Chynnyy vid 2023-02-01 [DSTU 9186:2022. Guidelines for the design of road subgrade. Valid from 2023-02-01]. Kyiv : DP "UkrNDNTS" Publ., 2022, 114 p. (in Ukrainian).
2. DSTU-N B.V.1.1.-40:2016. *Nastanova shchodo proektuvannya budivel' i sporud na slabkykh gruntakh* [DSTU-N B.V.1.1.-40:2016. Guidelines for the design of buildings and structures on weak soils]. Kyiv : Minrehionbud of Ukraine, 2017, 66 p. (in Ukrainian).
3. Drukovanyy M.F. and oth. *Armuvannya osnov budivel' i sporud : monohrafiya* [Reinforcement of foundations of buildings and structures]. Vinnytsya : UNIVERSUM-Vinnytsya, 2006, 235 p. (in Ukrainian).
4. Zotsenko N. and Vynnykov Y. Designing the compacted subsoil's using mathematical simulation method. *Proceedings of the XIII Danube-European Conference on Geotechnical Engineering* (Ljubljana, 2006). No. 2, pp. 385–390.
5. Kirichek Yu.A., Tregub A.V. and Tymchishin E.M. *Opredelenye dopuskaemoho davlenyya na osnovanyya fundamentov melkoho zalozhenyya po dannym chyslennoho uprugoplastycheskoho reshenyya* [Determination of the permissible pressure on the bases of shallow foundations based on the data of the numerical elastoplastic solution]. *Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk : Avtomobil'ni dorohy i dorozhnye budivnytstvo* [Scientific and technical collection : Highways and Road Construction]. Kyiv : NTU Publ., 2013, vol. 89, pp. 177–184. (in Russian).

6. Klepikov S.N. *Raschet sooruzheniy na deformiruyemom osnovanii* [Calculation of structures on a deformable foundation]. Kyiv : NIISK Publ., 1996, pp. 60–85. (in Russian).
7. Tugayenko Yu.F. *Razvitiye deformatsiy v osnovaniyakh fundamentov, sposoby ikh ogranicheniya i metody otsenki : monografiya* [Development of deformations in foundation bases, methods of their limitation and methods of assessment : monograph]. Odessa : Astroprint Publ., 2003, pp. 112–114. (in Russian).
8. Braja M. Das and Khaled Sobhan *Principles of Geotechnical Engineering*. Eighth Edition, SI – Cengage Learning, 2014, 770 p.
9. *DBN V.2.1-10:2018. Osnovy i fundamenty budivel' ta sporud. Osnovni polozhennya* [DBN V.2.1-10:2018. Foundations and foundations of buildings and structures. Basic provisions.]. Kyiv : Minrehionbud of Ukraine, 2018, 36 p. (in Ukrainian).
10. Brinkgreve R.B.J. and P.A. Vermeer. *PLAXIS : Finite Element Code for Soil and Rock Analyses*. Version 7, Balkema, 1998.
11. Schanz T. and Vermeer P.A. The Hardening Soil Model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. Balkema. Rotterdam, 1999, no. 1, pp. 281–290.

Надійшла до редакції: 03.03.2025.

УДК 620.17:624.011.1

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.140.1153

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ПЕРЕХРЕСНО-КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ

ШЕХОРКІНА С. Є.^{1*}, докт. техн. наук., проф.,
БОРДУН М. В.², докт. філософії,
МЕРИЛОВА І. О.³, канд. арх., доц.,
ЛЯСОТА О. В.⁴, асп.,
ФЕДІН В. А.⁵, асп.

^{1*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 021-84-44, e-mail: svitlana.shekhorkina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7799-2250

² Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (098) 260-11-91, e-mail: bordun.maryna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8539-2423

³ 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) 490-61-15, e-mail: irina.merilova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2019-0780

⁴ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 483-03-73, e-mail: lyasota198422@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4269-2434

⁵ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 882-28-08, e-mail: fedin.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8829-7520

Анотація. Постановка проблеми. Перехресно-клеєна деревина (ПКД) – це сучасний будівельний матеріал, який може бути використаний для зведення будівель різного призначення. Незважаючи на свою популярність закордоном, ПКД все ще залишається новим для України будівельним матеріалом, а в чинних нормах для проектування дерев'яних конструкцій відсутні рекомендації з розрахунку конструкцій з ПКД-панелей. Для поширення використання ПКД у вітчизняній практиці необхідне проведення досліджень характеристик міцності відповідно до міжнародних стандартів. **Мета статті** – дослідження характеристик міцності на згин та стиск ПКД вітчизняного виробництва шляхом випробувань згідно європейських стандартів. **Методика.** Для експериментальних досліджень були використані зразки елементів з ПКД вітчизняного виробника CLT-Result. Зразки склалися з пиломатеріалів хвойних порід (сосна *Pinus sylvestris* L.) в конфігурації 3 шарів товщиною 30 мм (товщина ПКД 90 мм) та 5 шарів товщиною 20 мм (товщина ПКД 100 мм). Виконані випробування на згин та стиск паралельно та перпендикулярно площині повздовжніх шарів відповідно до вимог EN 16351:2021 та EN 408:2012. **Висновки.** Міцність зразків ПКД на згин визначається міцністю деревини зовнішнього найбільш розтягнутого шару. Руйнування зразків при згинанні розпочиналося з утворення тріщин вздовж річних кілець деревини зовнішнього нижнього шару із подальшим розривом розтягнутих волокон. Зразки ПКД при випробуванні на стиск паралельно площині шарів руйнувались внаслідок вичерпання несучої здатності деревини поздовжніх шарів, що супроводжувалось зсувом по косих площадках. Руйнування ПКД при стисканні перпендикулярно площині шарів відбувалось внаслідок істотного спресовування деревини. Визначені наступні характеристики: міцність на згин 3-шарової ПКД-панелі становила 15,3 МПа, 5-шарової – 20,1 МПа; міцність на стиск 5-шарової ПКД-панелі паралельно площині шарів $f_{c,0} = 26,88...29,15$ МПа, перпендикулярно площині шарів $f_{c,90} = 11,16...12,13$ МПа.

Ключові слова: перехресно-клеєна деревина; згин; стиск; руйнівне навантаження; міцність

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE STRENGTH OF CROSS-LAMINATED TIMBER

SHEKHORKINA S.Yev.^{1*}, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
BORDUN M.V.², PhD,
MERYLOVA I.O.³, Cand. Sc. (Arch.),
LYASOTA O.V.⁴, Postgrad. Stud.,

FEDIN V.A.⁵, *Postgrad. Stud.*

^{1*} Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 021-84-44, e-mail: svitlana.shekhorkina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7799-2250

² Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (098) 260-11-91, e-mail: bordun.maryna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8539-2423

³ 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) 490-61-15, e-mail: irina.merilova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2019-0780

⁴ Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (096) 483-03-73, e-mail: lyasota198422@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4269-2434

⁵ Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 882-28-08, e-mail: fedin.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8829-7520

Abstract. Problem statement. Cross-laminated timber (CLT) is a modern building material that can be used in the construction of buildings for various purposes. Despite its popularity abroad, CLT is still a relatively new material in Ukraine, and the current standards for designing timber structures do not include recommendations for the calculation of structures made from CLT panels. To promote the use of CLT in domestic practice, it is necessary to conduct studies on its strength characteristics in accordance with international standards. **The purpose of the article** is to investigate the characteristics of bending and compressive strength of domestically produced CLT through tests according to European standards. **Methods.** For experimental studies, samples of elements from the CLT-Result domestic manufacturer were used. The samples consisted of coniferous lumber (pine *Pinus sylvestris* L.) in a configuration of 3 layers 30 mm thick (CLT thickness 90 mm) and 5 layers 20 mm thick (CLT thickness 100 mm). Bending and compression tests were performed parallel and perpendicular to the plane of the longitudinal layers in accordance with the requirements of EN 16351:2021 and EN 408:2012. **Conclusion.** The bending strength of CLT samples is determined by the strength of the timber of the outer, most stretched layer. The destruction of the samples during bending began with the formation of cracks along the annual rings of the wood of the outer lower layer, followed by the rupture of the stretched fibers. CLT samples, when tested for compression parallel to the plane of the layers, collapsed due to the exhaustion of the bearing capacity of the timber of the longitudinal layers, which was accompanied by shearing along the inclined areas. The destruction of the CLT compressed perpendicular to the plane of the layers occurred as a result of significant compression of the wood. The following characteristics were determined: the bending strength of the 3-layer CLT panel was 15.3 MPa, and the 5-layer panel had a bending strength of 20.1 MPa; the compressive strength of the 5-layer CLT panel parallel to the plane of the layers $f_{c,0} = 26.88...29.15$ MPa, and perpendicular to the plane of the layers $f_{c,90} = 11.16...12.13$ MPa.

Keywords: cross-laminated timber; bending; compression; failure load; strength

Постановка проблеми, мета і задачі дослідження. Будівництво з використанням деревини набирає все більшу популярність в світі, що пов'язано із потенціалом цього природного матеріалу як екологічно чистої альтернативи традиційним сталі та бетону. Перехресно-клеєна деревина (ПКД) – це інженерний виріб, що складається із непарної кількості склеєних між собою шарів (від 3 до 9) дошок, що укладаються у взаємно перпендикулярних напрямках [1]. ПКД була розроблена в 1990-х роках в Австрії і з того часу набула поширення в багатьох країнах як ефективний будівельний матеріал для будівель різного призначення, в тому числі багатопверхових [2; 3]. Даний продукт постійно удосконалюється з точки

зору ресурсоефективності, шляхом поєднання у панелі шарів з деревини різного класу міцності або породи, застосування в поперечних шарах конструкційних композитних матеріалів, таких як брус з клеєного шпону або стружки, орієнтовано-стружкові плити тощо [4]. Це своєю чергою потребує проведення експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей нових видів ПКД, яким присвячено роботи багатьох закордонних вчених [5–9].

Незважаючи на свою популярність закордоном, ПКД все ще залишається новим для України будівельним матеріалом. В чинних національних нормах для проєктування дерев'яних конструкцій [10] відсутні рекомендації з розрахунку будівель

з ПКД-панелей. Тим не менше, в Україні вже реалізовано ряд проєктів [11; 12]. Вітчизняними науковцями проводяться лабораторні випробування ПКД місцевого виробництва [13; 14]. Для поширення використання ПКД панелей у вітчизняній практиці будівництва необхідне проведення подальших досліджень, що дозволять отримати додаткові дані щодо характеристик міцності відповідно до міжнародних стандартів.

Метою даної роботи є дослідження характеристик міцності на згин та стиск перехресно-клеєної деревини вітчизняного виробництва шляхом випробувань згідно європейських стандартів.

Матеріали та методи досліджень.

Зразки елементів з ПКД були надані компанією CLT-Rezult. Сировиною для виготовлення є пиломатеріали хвойних порід (сосна *Pinus sylvestris* L.). Зразки склалися з трьох шарів товщиною 30 мм та п'яти шарів товщиною 20 мм. Таким чином, загальна товщина тришарової панелі становить 90 мм, а п'ятишарової – 100 мм. Ширина окремих дошок – 100 мм. Декларований виробником клас міцності вхідної сировини не нижче класу T10 або C16 згідно [15; 16] Вологість деревини – 12 %. Для склеювання шарів використовується однокомпонентний рідкий поліуретановий клей (тип I-PUR). Розміри зразків та процедура випробувань зразків ПКД на згин відповідали вимогам стандартів [17; 18]. Ширина зразків становила 600 мм, довжина – 2 000 мм. Схема та геометричні параметри зразка для випробування на згин приведені на рисунку 1.

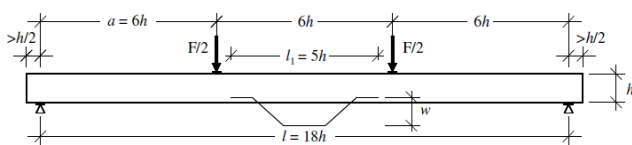


Рис. 1. Схема та геометричні параметри зразків для випробування на згин [18]

Для випробування ПКД-панель з обох кінців встановлювалась на шарнірно-нерухомих опорах. Навантаження на зразок створювалось за допомогою гідравлічного

пресу ИПС-500. Передача зосередженого навантаження на дві точки, як показано на схемі (рис. 1), забезпечувалась через траверсу. Вимірювання прогину здійснювалось за допомогою прогиномірів 6-ПАО, встановлених з обох сторін панелі в зоні центрального перерізу. Загальний вигляд зразка ПКД-панелі для випробування на тестовому стенді приведено на рисунку 2.



Рис. 2. Загальний вигляд зразка ПКД-панелі для випробування на згин

Міцність на згин за результатами випробувань визначалась за формулою:

$$f_m = \frac{3F_{\max}a}{bh^2}, \quad (1)$$

де $F_{\max}$ – максимальне навантаження; a – відстань між точкою навантаження та найближчою опорою під час випробування на згин; b , h – ширина та висота поперечного перерізу, відповідно.

Після випробувань на згин з ділянок ПКД-панелей, які зберегли цілісність, були виготовлені зразки для дослідження міцності на стиск паралельно та перпендикулярно площині шарів. Розміри зразків приймалися відповідно до вимог [17; 18]. Зразки склалися з п'яти шарів, кожен товщиною 20 мм. Загальна товщина становила 100 мм.

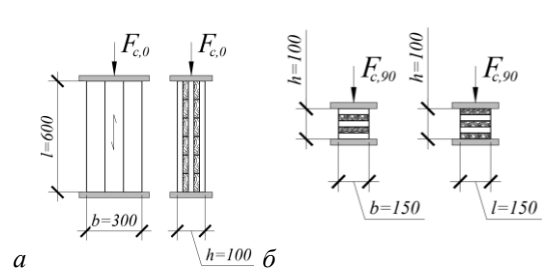


Рис. 3. Геометричні параметри зразків та схема випробувань на стиск перехресно-клеєної деревини:
а – паралельно площині шарів;
б – перпендикулярно площині шарів

Ширина та довжина зразка для випробувань на стиск паралельно площині шарів становила 300 та 600 мм, відповідно. Ширина та довжина зразка для випробувань на стиск перпендикулярно площині шарів складала 150 мм. Кількість зразків для обох видів випробувань – 3 шт. Геометричні параметри та схема випробувань на стиск приведені на рисунку 3.

Випробування зразків на стиск виконувалось на гідравлічному пресі П-125. Загальний вигляд зразків до проведення випробувань на стиск приведено на рисунку 4.

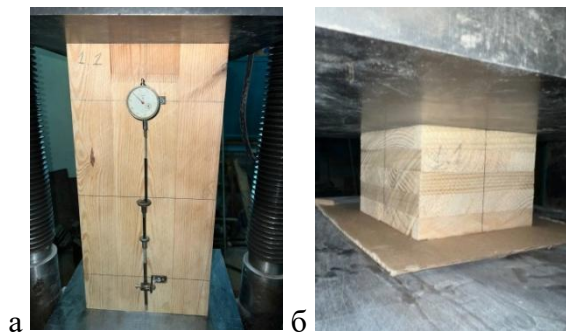


Рис. 4. Загальний вигляд зразків для випробувань на стиск: а – паралельно площині шарів; б – перпендикулярно площині шарів

Міцність на стиск визначалася за формулами:

$$f_{c,0} = F_{0,max} / A_0, \quad (2)$$

$$f_{c,90} = F_{90,max} / A_{90}, \quad (3)$$

де $f_{c,0}$, $f_{c,90}$, $F_{0,max}$, $F_{90,max}$ – міцність на стиск та максимальне навантаження паралельно та перпендикулярно площині шарів, відповідно; A_0 , A_{90} – площа поперечного перерізу зразка для випробування на стиск паралельно та перпендикулярно площині шарів, відповідно.

Таблиця 1

Результати випробування зразків ПКД-панелей на згин

Тип зразка	Розміри перерізу, мм		Руйнівне навантаження, F_{max} кН	Міцність на згин, f_m , Н/мм ²	Прогин при $0.6F_{max}$, w_e , мм
	b	h			
3 шари	600	90	45	15.3	13.5
5 шарів	600	100	73	20.1	18

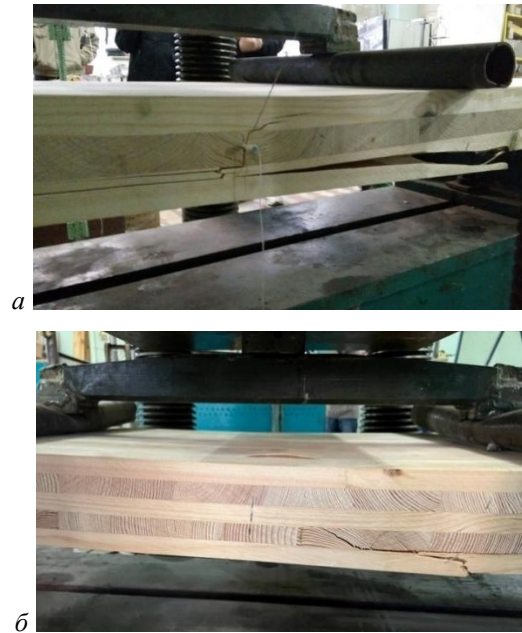


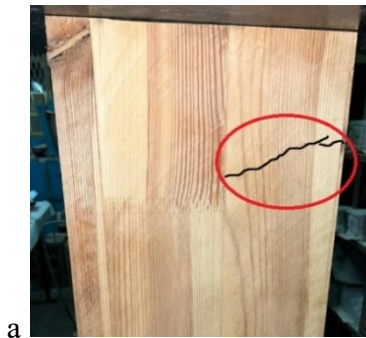
Рис. 5. Характер руйнування зразків ПКД при випробуванні на згин: а – 3 шари (90 мм); б – 5 шарів (100 мм)

Результати. В результаті випробувань на згин було отримано величину руйнівного навантаження, а також визначено характер руйнування зразків, що наведено рисунку 5. Фактичні значення руйнівного навантаження та міцності клеєної деревини на згин, а також їх порівняння з теоретичними значеннями приведено в таблиці 1.

Міцність зразків ПКД панелей на згин визначається міцністю деревини зовнішнього найбільш розтягнутого шару. Обидва зразки ПКД демонстрували подібну картину руйнування. Утворення тріщин розпочиналося вздовж річних кілець деревини зовнішнього нижнього шару із подальшим розривом розтягнутих волокон. При подальшому збільшенні навантаження руйнування від розриву поширювалося до лінії склеювання з переходом до вищерозташованих шарів. Слід відзначити, що при цьому шипові з'єднання дошок по довжині, які потрапляли в розтягнуту зону, залишилися суцільними.

Отримані дані показали, що збільшення кількості шарів впливає на підвищення міцності панелі на згин, в той час як автори подібних досліджень [7–9] зазначали незначне зменшення руйнівного навантаження для зразків з п'яти шарів

порівняно із тришаровими зразками. Міцність на згин 3-шарової ПКД-панелі становила 15,3 МПа, тоді як 5-шарової – 20,1 МПа. Різниця в міцності між 3- та 5-шаровими панелями ПКД може бути пов'язана з процесом виробництва. Зокрема істотний вплив може мати тривалість та тиск під яким відбувається процес склеювання панелі. З огляду на це потрібно проведення додаткових досліджень роботи ПКД панелей на згин при різній кількості та товщині шарів.



а



б

Рис. 6. Характер руйнування зразків ПКД при випробуванні на стиск : а – паралельно площині шарів; б – перпендикулярно площині шарів

Як видно з рисунку 6, руйнування зразків ПКД при випробуванні на стиск паралельно площині шарів відбувалось внаслідок вичерпання несучої здатності деревини поздовжніх шарів на стиск і супроводжується зсувом по косих площадках. При цьому для всіх випробуваних зразків площини склеювання залишилися суцільними, що свідчить про якість клейового з'єднання між поздовжніми та поперечними шарами ПКД.

Зразки, що випробувались на стиск перпендикулярно площині шарів, під дією навантаження зазнавали спресовування та істотного деформування в різних напрямках. За умовне руйнівне навантаження приймали значення, при якому зразок стискався на ~20 мм.

Фактичні розміри, величина руйнівного навантаження та міцності ПКД на стиск, а також їх порівняння з теоретичними значеннями приведено в таблицях 2, 3.

Таблиця 2

Результати випробування зразків ПКД на стиск паралельно площині шарів

Номер зразка	Фактичні розміри, мм			Руйнівне навантаження, кН	Міцність, МПа
	h	b	l		
1	100	295	598	860	29,15
2	100	292	600	785	26,88
3	100	298	600	847	28,42

Таблиця 3

Результати випробування зразків ПКД на стиск перпендикулярно площині шарів

Номер зразка	Фактичні розміри, мм			Руйнівне навантаження, кН	Міцність, МПа
	h	b	l		
1	100	145	145	245	11,65
2	100	145	145	255	12,13
3	100	145	147	238	11,16

Випробувані зразки характеризуються незначними розбіжностями значень руйнівного навантаження та міцності на стиск, що свідчить про однорідність властивостей. Міцність на стиск паралельно площині шарів становила $f_{c,0} = 26,88...29,15$ МПа. Міцність на стиск перпендикулярно площині шарів становила $f_{c,90} = 11,16...12,13$ МПа. Загалом результати випробувань збігаються із аналогічними дослідженнями закордонних та вітчизняних авторів [7–9; 13; 14].

Висновки

Шляхом випробувань згідно європейських стандартів проведені експериментальні дослідження характеристик міцності на згин та стиск ПКД вітчизняного виробництва з деревини хвойних порід місцевого походження. Міцність зразків ПКД на згин визначається міцністю деревини зовнішнього найбільш розтягнутого шару. Руйнування зразків при згинанні розпочиналося з утворення тріщин вздовж річних кілець деревини зовнішнього нижнього шару із подальшим розривом розтягнутих волокон. Зразки ПКД при випробуванні на стиск паралельно площині

шарів руйнувались внаслідок вичерпання несучої здатності деревини поздовжніх шарів, що супроводжувалось зсувом по косих площадках. Руйнування ПКД при стисканні перпендикулярно площині шарів відбувалось внаслідок істотного спресовування деревини. В результаті були отримані наступні характеристики: міцність на згин 3-шарової ПКД-панелі становила

15,3 МПа, тоді як 5-шарової – 20,1 МПа; міцність на стиск паралельно площині шарів $f_{c,0} = 24,83..29,15$ МПа; міцність на стиск перпендикулярно площині шарів $f_{c,90} = 11,16..12,13$ МПа.

Подальшим напрямком досліджень є аналіз впливу кількості та товщини шарів на міцність та деформативність ПКД-панелей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Yusoh A. S., Anwar U.M.K., Lee Sh., Ong C., Asniza M., Paridah M. The properties of Cross Laminated Timber (CLT) : a review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2025. Vol. 138. P. 103924. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103924> (дата звернення: 11.01.2025).
2. Jayalath A., Navaratnam S., Ngo T., Mendis P. A., Hewson N., Aye L. Life cycle performance of Cross Laminated Timber mid-rise residential buildings in Australia. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 223. P. 110091. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110091> (дата звернення: 11.01.2025).
3. Shin B., Wi S., Kim S. Assessing the environmental impact of using CLT-hybrid walls as a sustainable alternative in high-rise residential buildings. *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 294. P. 113228. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113228> (дата звернення: 11.01.2025).
4. Yin T., Song H., Wang Z., Li L., Zheng W., Ju Z., Gong Y., Gong M. Long-term creep properties of hybrid CLT fabricated with lumber and OSB. *Industrial Crops and Products*. 2024. Vol. 211. P. 118238. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118238> (дата звернення: 11.01.2025).
5. Sikora K. S., McPolin D. O., Harte A. M. Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 116. Pp. 141–150. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145> (дата звернення: 11.01.2025).
6. Muñoz F., Tenorio C., Moya R., Navarro-Mora A. CLT Fabricated with Gmelina arborea and Tectona grandis Wood from Fast-Growth Forest Plantations : Physical and Mechanical Properties. *Journal of Renewable Materials*. 2022. Vol. 10 (1). Pp. 1–17. URL: <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017392> (дата звернення: 11.01.2025).
7. Norshariza M. B., Lum W. C., Azmi A., Nordin M. S., Yam N. W. S., Ahmad Z., Lee S. H. Bending, Compression and Bonding Performance of Cross-Laminated Timber (CLT) Made from Malaysian Fast-Growing Timbers. *Journal of Renewable Materials*. 2022. Vol. 10 (11). Pp. 2851–2869. URL: <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.022326> (дата звернення: 11.01.2025).
8. He M., Sun X., Li Z., Feng W. Bending, shear, and compressive properties of three- and five-layer cross-laminated timber fabricated with black spruce. *Journal of Wood Science*. 2020. Vol. 66 (38). Pp. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01886-z>
9. Boggian F., Andreolli M., Tomasi R. Cross Laminated Timber (CLT) Beams Loaded in Plane : Testing Stiffness and Shear Strength. *Frontiers in Built Environment*. 2019. Vol. 58. Pp. 1–12. URL: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00058>
10. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Основні положення. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2017. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-807>
11. UNBROKEN відкрив новий центр протезування та ортезування. URL: <https://unbroken.org.ua/ua/news/unbroken-vidkryv-novyj-czentr-protezuвання-ta-ortezuvannya> (дата звернення: 11.01.2025).
12. CLT REZULT. UNBROKEN : Реконструкція реабілітаційного центру у Львові. URL: <https://clt-rezult.com/news/unbroken/> (дата звернення: 11.01.2025).
13. Бідаков А. М., Кочкар'єв Д. В., Пустовойтова О. М. Міцність та деформативність панелей з поперечно клеєної деревини (пкд) або clt панелей вітчизняного виробництва. *Науковий вісник будівництва*. 2024. Вип. 111. С. 75–83. URL: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.111.1.10>
14. Бідаков А. М., Пустовойтова О. М., Распопов Є. А., Страшко Б. О. Міцність пкд панелей при розтягу та стиску вздовж волокон. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2020. Вип. 1. С. 5–10. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-1-5-10>
15. ДСТУ EN 14080:2013, (EN 14080:2013, IDT). Конструкції дерев'яні. Шарувата клеєна деревина та масивна клеєна деревина. Вимоги. Розробник : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості».
16. ДСТУ EN 338:2022, (EN 338:2016, IDT). Конструкційний лісоматеріал. Класи міцності. Розробник : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості».
17. EN 16351:2021, Timber structures. Cross laminated timber. Requirements. European committee for standardization. CEN-CENELEC, Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels.

18. EN 408:2012. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European committee for standardization. CEN-CENELEC, Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels.

REFERENCES

1. Yusoh A.S., Anwar U.M.K., Lee Sh., Ong C., Asniza M. and Paridah M. The properties of Cross Laminated Timber (CLT) : a review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2025, vol. 138, p. 103924. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103924> (accesss date: 11.01.2025).
2. Jayalath A., Navaratnam S., Ngo T., Mendis P. A., Hewson N. and Aye L. Life cycle performance of Cross Laminated Timber mid-rise residential buildings in Australia. *Energy and Buildings*. 2020, vol. 223, p. 110091. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110091> (accesss date: 11.01.2025).
3. Shin B., Wi S. and Kim S. Assessing the environmental impact of using CLT-hybrid walls as a sustainable alternative in high-rise residential buildings. *Energy and Buildings*. 2023, vol. 294, p. 113228. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113228> (accesss date: 11.01.2025).
4. Yin T., Song H., Wang Z., Li L., Zheng W., Ju Z., Gong Y. and Gong M. Long-term creep properties of hybrid CLT fabricated with lumber and OSB. *Industrial Crops and Products*. 2024, vol. 211, p. 118238. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118238> (accesss date: 11.01.2025).
5. Sikora K.S., McPolin D.O. and Harte A.M. Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 116, pp. 141–150. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145> (accesss date: 11.01.2025).
6. Muñoz F., Tenorio C., Moya R. and Navarro-Mora A. CLT Fabricated with Gmelina arborea and Tectona grandis Wood from Fast-Growth Forest Plantations : Physical and Mechanical Properties. *Journal of Renewable Materials*. 2022, vol. 10 (1), pp. 1–17. URL: <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017392> (accesss date: 11.01.2025).
7. Norshariza M.B., Lum W.C., Azmi A., Nordin M.S., Yam N.W.S., Ahmad Z. and Lee S.H. Bending, Compression and Bonding Performance of Cross-Laminated Timber (CLT) Made from Malaysian Fast-Growing Timbers. *Journal of Renewable Materials*. 2022, vol. 10 (11), pp. 2851–2869. URL: <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.022326> (accesss date: 11.01.2025).
8. He M., Sun X., Li Z. and Feng W. Bending, shear, and compressive properties of three- and five-layer cross-laminated timber fabricated with black spruce. *Journal of Wood Science*. 2020, vol. 66 (38), pp. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01886-z>
9. Boggian F., Andreolli M. and Tomasi R. Cross Laminated Timber (CLT) Beams Loaded in Plane : Testing Stiffness and Shear Strength. *Frontiers in Built Environment*. 2019, vol. 58, pp. 1–12. URL: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00058>
10. DBN V.2.6-161:2017. *Derevyani konstruktsiyi. Osnovni polozhennya. Vyd. ofits. (Derzhavni budivelni normy Ukrayiny)*. [SCU V.2.6-161:2017. Wooden structures. Basic provisions. Official edition]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2017. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-807> (in Ukrainian).
11. UNBROKEN vidkryv novyy tsentr protezuvannya ta ortezuvannya [UNBROKEN opened a new prosthetics and orthotics center]. URL: <https://unbroken.org.ua/ua/news/unbroken-vidkryv-novyj-czentr-protezuvannya-ta-ortezuvannya> (accesss date: 11.01.2025). (in Ukrainian).
12. CLT REZULT. UNBROKEN: Rekonstruktsiya reabilitatsynoho tsentru u Lvovi. [UNBROKEN: Reconstruction of a rehabilitation center in Lviv.] URL: <https://clt-rezult.com/news/unbroken/> (accesss date: 11.01.2025). (in Ukrainian).
13. Bidakov A.M., Kochkarov D.V. and Pustovoytova O.M. *Mitsnist ta deformatyvnist paneley z poperechno kleyenoyi derevyiny (pkd) abo clt paneley vitchyznyanoho vyrobnytstva* [Strength and deformability of cross-laminated timber (CLT) panels or CLT panels of domestic production]. *Naukovy visnyk budivnytstva* [Scientific Bulletin of Construction]. 2024, vol. 111, pp. 75–83. URL: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.111.1.10> (in Ukrainian).
14. Bidakov A.M., Pustovoytova O.M., Raspopov Ye.A. and Strashko B.O. *Mitsnist pkd paneley pry roztyahu ta stysku vzdovzh volokon* [Strength of CLT panels in tension and compression along the fibers]. *Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi* [Modern Technologies, Materials and Structures in Construction.]. 2020, vol. 1, pp. 5–10. URL: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-1-5-10> (in Ukrainian).
15. DSTU EN 14080:2013, (EN 14080:2013, IDT). *Konstruktsiyi derevyani. Sharuvata kleyena derevyina ta masyvna kleyena derevyina. Vymohy* [Timber structures. Glued laminated timber and solid glued timber. Requirements]. Developer : SE “Ukrainian Scientific Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality”. (in Ukrainian).
16. DSTU EN 338:2022, (EN 338:2016, IDT). *Konstruktsiynyy lisomaterial. Klasy mitsnosti* [DSTU EN 338:2022, (EN 338:2016, IDT). Structural timber. Strength classes]. Developer : SE “Ukrainian Scientific Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality Problems”. (in Ukrainian).
17. EN 16351:2021. Timber structures. Cross laminated timber. Requirements. European committee for standardization. CEN-CENELEC, Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels.
18. EN 408:2012. Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties. European committee for standardization. CEN-CENELEC, Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels.

Надійшла до редакції: 15.01.2025.

УДК 624.131:631.482.44

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.147.1154

SOME MORPHOLOGICAL FEATURES OF THE EOLIAN-ALLUVIAL SANDS OF THE INDUSTRIAL SITE AT THE ZAPORIZHZHIA NPP

SEDIN V.L.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
ULYANOV V.Yu.², Ass.,
KOVBA V.V.^{3*}, Ph. D., Assoc. Prof.,
ZAHILSKYI V.A.⁴, Ph. D., Assoc. Prof.,
BIKUS K.M.⁵, Ph. D., Assoc. Prof.,
GORLACH S.M.⁶, Ph. D., Assoc. Prof.

¹Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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, e-mail: sedin.volodymyr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

²Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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, e-mail: ulyanovvu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9028-3408

^{3*}Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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) 588-46-71, e-mail: kovba.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7888-4393

⁴Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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, e-mail: zahilskiyi.vitalii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7853-565X

⁵Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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, e-mail: bikus.kateryna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0008-4636-5503

⁶Department of Engineering Geology and Geotechnics, 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, e-mail: gorlach.serhii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6511-7574

Abstract. Problem statement. The authors used a complex index of soil morphology in the research, with regard to the shape and character of grain surface in the entire volume of sands under research. A morphological assessment was carried out for the entire volume of the studied sandy soil. An important factor in the formation of the shape and character on the sand grains surface is the mineral composition of the sand. Quartz was the predominant mineral in most of the studied sands. Further research involves studying other mineral differences. This will provide data on the formation of contacts between sand grains, which are different from spheres and can be plate-like shape or other shapes. For the first time, the main morphological characteristics of eolian-alluvial and alluvial quaternary sands in the Dnipro Valley were obtained for the industrial site at the Zaporizhzhia NPP in Enerhodar City. Moreover, it was for the first time in a vertical section of the sand mass. One can note the identified decrease in the morphology index in the river sands of the Dnipro Valley from the sources to the mouth. Numerous values about the morphology indices of sands at the NPP site were obtained. Criteria for separating eolian and eolian-alluvial sands in the section were also proposed. **Purpose of the article.** Obtaining data on the morphology of eolian-alluvial and alluvial sands for the industrial site at the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant (NPP) in Enerhodar City, which is missing. Or more precisely, obtaining reliable quantitative indices that can be used in calculations of soil foundations. **Conclusions and results.** This paper presents the results of determining the morphology index for the industrial site at the Zaporizhzhia NPP in Enerhodar City. It also presents studying the shape and character of the sand grains surface of alluvium for the vitachevo-bug horizon of the first supra-floodplain terrace in the Dnipro Valley in this area. Additionally, the results of similar works on the study of genetic types of Quaternary sands of the different genesis for the Dnipro Valley were analyzed. As a result of the research, data were obtained on the morphology of monomineralic oligomictic alluvial sands, their shape, and the character of the sand grains surface. The results of the research can be implemented into the subgrade soils of NPP buildings and structures. Also, they can be applied to calculations for the post-war reconstruction of hydraulic engineering and transport structures at the NPP site – inlet and outlet channels, as well as the dam of the cooling pond.

Keywords: sandy soils sand particles; contacts between grains; number of grains; grain sphericity; grain morphology; sand fractions

МОРФОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЕОЛОВО-АЛЮВІАЛЬНИХ ПІСКІВ МАЙДАНЧИКУ ЗАПОРІЗЬКОЇ АЕС

СЄДІН В. Л.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
УЛЬЯНОВ В. Ю.², *ас.*,
КОВБА В. В.^{3*}, *канд. техн. наук, доц.*,
ЗАГІЛЬСЬКИЙ В. А.⁴, *канд. техн. наук, доц.*,
БІКУС К. М.⁵, *канд. техн. наук, доц.*,
ГОРЛАЧ С. М.⁶, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра інженерної геології і геотехніки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: sedin.volodymyr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2293-7243

² Кафедра інженерної геології і геотехніки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: ulianovvu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9028-3408

^{3*} Кафедра інженерної геології і геотехніки, 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) 588-46-71, e-mail: kovba.vladyslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5140-8140

⁴ Кафедра інженерної геології і геотехніки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: zahilskiy.vitalii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7853-565X

⁵ Кафедра інженерної геології і геотехніки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: bikus.kateryna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0008-4636-5503

⁶ Кафедра інженерної геології і геотехніки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: horlach.serhii@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6511-7574

Анотація. Постановка проблеми. У дослідженнях був використаний комплексний показник морфології ґрунтів, що враховує форму і характер поверхні зерен пісків, що досліджувалися. Важливим фактором утворення форми та характеру поверхні піщаних зерен є мінеральний склад піску. У більшості досліджених пісків переважаючим мінералом був кварц. У подальших дослідженнях намічено вивчення інших мінеральних відмінностей. Це дозволить отримати дані про формування контактів між піщаними зернами, які відмінні від округлої форми і можуть мати пластинчасту та інші форми. У статті були запропоновані критерії поділу у розрізі еолових та еолово-алювіальних пісків. Результати проведених досліджень можуть бути імплементовані в ґрунти основ будівель і споруд АЕС. Також, результати досліджень можуть бути застосовані для розрахунків у післявоєнній реконструкції гідротехнічних та транспортних споруд майданчика АЕС (каналів, що підводять і відводять), а також греблі ставка-охолоджувача. **Мета статті.** Визначення даних про морфологію еолово-алювіальних та алювіальних пісків для промайданчика Запорізької АЕС у м. Енергодар (які відсутні), а саме: достовірні кількісні показники, які можуть бути використані у розрахунках ґрунтових основ. **Висновки.** У роботі наведено результати визначення показника морфології промайданчика Запорізької АЕС у м. Енергодар. Також у роботі досліджено форму та характеру поверхні піщаних зерен алювію вітачівсько-бузького горизонту першої надзаплавної тераси долини м. Дніпро у цьому районі. Додатково проаналізовано результати аналогічних робіт з вивчення генетичних типів четвертинних пісків різної генези долини Дніпра. В результаті досліджень були отримані дані про морфологію мономінеральних олігоміктових алювіальних пісків, їх форму і характер поверхні. Вперше для промайданчика Запорізької АЕС у м. Енергодар були отримані основні морфологічні характеристики еолово-алювіальних та алювіальних четвертинних пісків долини Дніпра, причому, вперше і у вертикальному розрізі товщі пісків. Можна відзначити виявлене зниження показника морфології у річкових пісках долини Дніпра від витоків до гирла.

Ключові слова: *піщані ґрунти; піщані частинки; контакти між зернами; число зерен; сферичність зерна; морфологія зерен; піщані фракції*

Formulation of the problem. During data analysis of high-precision geodetic observations about the condition of the main buildings and structures of NPP units, an assumption has emerged that the load-bearing

properties of sandy subgrades are influenced by many factors, including the morphological features of sands of eolian-alluvial genesis. The data from engineering surveys that were carried out at the site throughout the entire operating

cycle of the NPP were also worthy of attention. The changes in the features of sandy soils affected the surface artificial structures of the site to the greatest extent. These include hydraulic structures and the main one is the dam of the cooling pond. This also applies to the sites where the main transformers of power units are located. This article is devoted to resolving questions about the possible causes of the hitherto unstabilized settlements of individual buildings and structures at the NPP site.

Physico-geographical and technogenic conditions. Geomorphologically, the research area is located within the first supra-floodplain (sandy) left bank vitachevo-bug terrace of the Dnipro River. The research area is located on the left bank of the Kakhovka Reservoir (Note: at the time of writing this article, it no longer exists).

Before the start of construction, the research area was represented by the waters of the Kakhovka Reservoir. This reservoir was formed in the flooded floodplain of the Konka River as well as on the shore terrace of the Dnipro River with eolian relief forms (so-called “vegetated sand dune/kuchuhurs”) and absolute surface elevations from 18.00 m to 25.0 m.

Currently, the surface of the site for blocks 1–6 is planned to absolute elevation of 22.0 m. The relief of hydraulic structures and the dam body of the cooling pond is slightly hilly, predominantly eolian, formed by the re-winnowing of sands. In some places, the sands are supported by woody and herbaceous vegetation.

Engineering-geological characteristics of the site. Granites of the Archean-Proterozoic age take part in the geological structure of the site. They form the crystalline foundation of the Ukrainian Shield and at depths of 55–85 m are covered by a stratum of kaolin weathering crust. There are embedded higher the clays of the Serogozian stage of the Paleogene and sandstones of the Buchak stage. The clays are greenish-gray, dense, with rare inclusions of sandstone nodules. They were defined at a depth of 33–35 m. Paleogene clays underlie a layer of Quaternary alluvial sands. Alluvial dense sands of intermediate size up to 12 m

thick underlay on the clays. Small eolian-alluvial sands of medium-dense and dense composition with a maximum thickness of up to 20 m overlay above. Flood-plain sandy loams and dark gray loams with an admixture of plant remains, sandy loams and loams of soft plastic consistency with 0.2–3.8 m thickness are found in the stratum of fine sands. The entire sand sequence below the groundwater level (GWL) is water-encroached. Fine-grained sands of medium density form the basis of most buildings and structures in the industrial zone of the NPP, the state district power station (SDPS), and Enerhodar city.

The widespread distribution of bulk sandy soils is a special feature of the NPP site. Bulk soils were formed as a result of large-scale planning measures during the construction of facilities.

Based on the results of dynamic sounding, static sounding, and radioactive logging, the sand thickness is conventionally divided into 4 engineering geological elements. They are characterized by heterogeneous indicators of physical and mechanical properties. Bulk soils are fine yellowish-brown sands, of medium density and dense structure, low-moisture and water-saturated, with a thickness of 0.5 to 4.5 m. There are also fine, loose, and extremely loose sands, low moisture, and saturated with water. The thickness of loose sands is from 1 to 10 m. The thickness of extremely loose sands is from 0.3 to 5.0 m. Extremely loose sands are found at depths of 4.0–7.5 m (below the groundwater level). Fine sands are characterized by a sharp predominance of the 0.1–0.25 mm fraction over the 0.25–0.5 mm fraction. At the same time, the content of other fractions is insignificant.

The content of the 0.1–0.25 mm fraction in loose and especially loose varieties of fine sand reaches 65 % or even more. In addition to fine sands, medium-sized sands are also found at the base of the dam. The dam of the NPP cooling pond was built on fine bedrock alluvial sands using the hydraulic alluvium method. The dam body is also heterogeneous in density. It consists of fine and medium sands of medium density and dense structure. Based on the results of engineering surveys, loose and

extremely loose, dynamically unstable, fine, and medium sands were also identified in certain sections of the dam. On the sections of the dam that were constructed using the dry method, fine, loose, and medium-density sands are also identified. The delineation of zones of loose and extremely loose sands has not yet been completed. This is especially true for sections of the dam on the side of the Kakhovka Reservoir.

It was noted above that a feature of the entire area where the Zaporizhzhia NPP and the Enerhodar City are located is the presence of the so-called. “kuchugur” relief forms of eolian genesis. These relief forms are also characteristic of some other areas of the Dnipro Valley. Eolian relief forms have been preserved near the sites of NPP and SDPS. It was pointed out in the survey materials during the NPP construction that the Paleogene deposits are covered precisely by the stratum of eolian-alluvial sands of the upper and modern sections of the Quaternary system. However, in subsequent materials of engineering-geological study of the area, the term “eolian” actually disappears. However, this type of deposits is very interesting and little studied from an engineering viewpoint. In many geological reference books, these deposits are conventionally classified as deposits of problematic age (eolQIII-IV). The boundaries of eolian and eolian-alluvial deposits in the territory under consideration in a vertical section have never been precisely defined. The principles of their separation are also have not been fully defined. The morphological features of the sands themselves are still unclear.

Analysis of engineering survey materials during the operation of facilities.

The main geological risks at the Zaporizhzhia NPP site are associated with the development of exogenous geological processes. This is a widespread occurrence of technogenic soils with increased compressibility and low bearing capacity. In recent years, signs of technogenic decompaction of backfill sands have appeared. As a result of comparing dynamic-sounding data at adjacent points over several years, it was found that loose sands at the NPP site are being

replaced by extremely loose sands. According to the results of engineering surveys, not only the widespread development of loose sands was noted, but also the great depth of their occurrence (up to 8.0... 10.0 m). The frequency of occurrence of sands of extremely loose structure is quite high (such sands were found in ~ 40 % of all sounding points). Not only the foundations of shallow structures but even part of the pile foundations of some objects were found in the stratum of unconsolidated loose sands. The most dangerous sands for structures are loose and extremely loose sands. This is due to the possibility of settlement with complete water saturation and liquefaction with complete loss of bearing capacity because of dynamic impact (earthquakes, aircraft, missile and artillery strikes, long-term vibration). Sands of extremely loose composition when soaked give a settlement of 25...30 % only due to their own weight. With a small dynamic impact (0.4...0.6 g), the settlement increases by another 10...15 %. The total linear settlement reaches 35...40 %. With an average thickness of extremely loose sands of 1.5...1.8 m, the settlement due to compaction of the base sands can be 50...60 cm.

The dam of the cooling pond at the Zaporizhzhia NPP is of particular interest. It is generally accepted that the main unfavorable technogenic factor is the high level of groundwater, which can slow down the stabilization processes of ground settlement in the dam body of the cooling pond. The influence of changes in the chemical composition and temperature of groundwater is also possible. But the degree of their influence on these processes has yet to be assessed. The quantitative degree of influence of groundwater with high temperatures on reducing the strength and deformation characteristics of the sands of the dam body has also not been determined. During the engineering surveys carried out in the stratum of the loose alluvial sands of the dam body, zones of their technogenic decompaction to a dynamically unstable state were also identified. It was noted that dynamically unstable layers of alluvial sands are confined to zones near the groundwater table. This was quite evident in almost all

dynamic-sounding graphs. At the very beginning of construction, facts of the slope slide during the alluviation of the dam body were noted. The cooling pond dam of the Zaporizhzhia NPP had no analogs in the USSR and was experimental. This predetermined the future problems associated with its stability. In addition to the sliding of slopes during construction, the following negative phenomena were recorded during operation:

- slope failure of the bucket adjacent to pumping station No. 1 supplying water to the cooling towers from the side of the spray pools;
- sliding of the coastal ledge composed of loose backfill sands in the area adjacent to the building of pumping station No. 1;
- the surfacing of a section of the pressure pipeline for supplying water to spray pools, etc.

It should be especially noted that during the period of engineering surveys at the design stage of the NPP itself, soils in this condition were not found in this section of the site. However, according to surveys of residents, it was revealed that even before the start of construction, areas of the spread of the so-called “quicksand” had been still noted in local *plavni* (marshy). Cases of missing large domestic animals have been repeatedly reported in these areas. Presumably, it was in such areas that the content of the main fraction (0.1–0.25 mm) in loose varieties of fine bedrock sands reached 85 % versus 57 % on average on the site.

For bulk soils at the NPP industrial site, a relatively high (65 %) content of fractions of 0.1–0.25 mm is typical. The vertical planning of the site was carried out by cutting off eolian landforms and backfilling the basins with eolian sands. Thus, the upper part of the geological section of the site was composed of eolian sands. Which was the root cause of all the negative processes and phenomena on it. Since it is known from numerous experiments that it is eolian sands that have the weakest structural connections.

Similar processes were observed at the site of the Zaporizhzhia SDPS, which is located next to the NPP. There, loose bulk soils were uncovered too in the area of the main block transformers. But they were mainly traced

along the route of the city sewage collector with a diameter of 1 500 mm, which crosses the section of so-called light courtyards. The presumed cause is suffusion sand removal through poorly made joints. Loose fine sands produce significant settlements when moistened with destruction of the soil structure (liquefaction) under dynamic impact.

The purpose of the article. The reporting materials of additional engineering-geological surveys for the NPP site indicated that the causes of landslide processes and technogenic decompaction of soils in individual areas have not yet been clarified. In reports on the results of experimental studies of DCEI-PSACEA, it was recognized that the dynamic stability of sands also varies depending on their structural features.

The greatest influence on the dynamic stability of sands is exerted by the composition density, particle size, the presence of mixed-type “films” on their surface, and the degree of roundness of their grains. As a result of research on fine sands of various densities, it was concluded that loose sands under dynamic loads have low dynamic stability. And that this stability increases with the increasing density of sand particles. An increase in the number of silt-clay particles and the formation of a hydrophilic film leads to an even greater decrease in the dynamic stability of sands.

The phenomenon of vibro-creep is usually considered in calculations of the general settlement of foundations by introducing reduction factors to the deformation modulus. Stabilization of vibro-creep and settlement usually occurs within 3...4 years, but at the Zaporizhzhia NPP, vibro-creep of sands has been evident for 15 years. This indicates the influence of additional technogenic factors: an increase in the level and temperature of groundwater, a decrease in the density of sand foundations, saturation of groundwater with petroleum products, long-term technogenic microvibrations of the surface layers of sandy soils above the GWL, etc. Other reasons are quite possible.

The consequences of some of them, in particular, the mine-explosive effects of summer-autumn 2022 on the soils of the

industrial site have yet to be assessed. Such an impact took place in the area of the dry storage site for spent nuclear fuel, special building No. 1, blocks 1 and 6, and isotope storage. In the adjacent territory, this is a forest area near ORU-750 750 kW outdoor switchgear, a fire station, the mouth of a discharge canal from the SDPS, etc. Thus, there is an areal dynamic impact on the upper soil horizon of the industrial zone at the NPP and the SDPS. At one time, completely insufficient attention was paid to the study of the hydrogeochemical and geotechnical interaction of the elements in the “NPP cooling pond – dam – Kakhovka Reservoir” system.

Also, little attention was paid to an in-depth study of the morphological characteristics of the Quaternary eolian-alluvial sands in the upper part of the soil section. These deposits were the main material for the layout of the site as a whole as well as for alluviation of the largest hydraulic structures at the NPP – the dam body of the cooling pond. All of the listed characteristics must be studied following the requirements of the regulatory document – RD 34 15.073-91 [8]. They needed to be carefully studied since they could directly influence the stabilization of settlements and tilts of critical buildings and structures of the NPP itself. However, this document was adopted after the completion of the main construction cycle work at the NPP site. After the liquidation of the USSR, its provisions were not taken into consideration and remained unfulfilled.

The numerical values of the main morphological characteristics of sands were still unknown, especially in the vertical section. The study of the morphological features of the vertical section of the sands at the Zaporizhzhia NPP site with obtaining reliable quantitative indicators was the main goal of the research.

Materials and Methods. The genesis of sands, as well as the complex and multifactorial nature of their properties, determine the need for an integrated approach to an in-depth study and assessment of their construction properties. A genetic approach to studying the construction properties of sands requires identifying and evaluating the main genetic characteristics with appropriate indicators.

According to the degree of specificity, the morphological features of sands should also be included among the main genetic characteristics [9]. Since they most significantly influence the construction properties of sands.

Morphological research is carried out to identify the characteristics of the shape, the nature of the surface of grains of various lithological-genetic and mineralogical-petrographic varieties of sands. In hydraulic engineering and energy construction, an accelerated assessment of the morphology of grains of sand fractions with a size of 0.05–2.0 mm is carried out by the so-called express method.

The method consists of “spilling a hinge plate of air-dry sand fractions from a standard glass funnel.” A conventional characteristic of the general features of the morphology of sand grains is the grain morphology index λ . It is defined as a function of the spilling time of a hinge plate of the studied air-dry sand fraction from the funnel. The device for determining the morphology of sand grains and the necessary equipment are shown in Fig. 1.

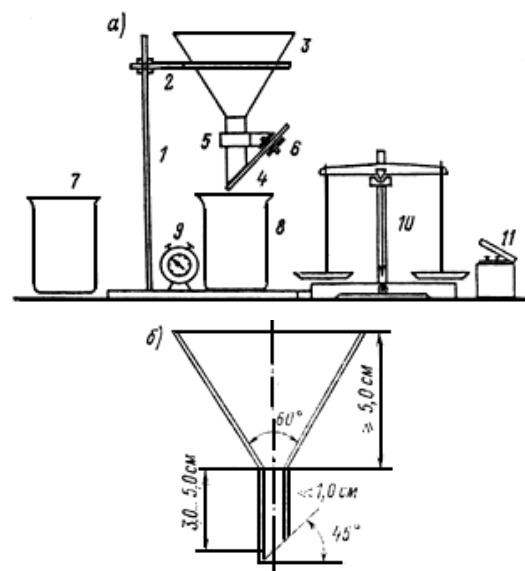


Fig. 1. Scheme of the device for determining the morphology of sand grains: a – equipment of the device set; b – drawing of the funnel; 1 – tripod; 2 – funnel holder; 3 – glass case of the funnel; 4 – latch; 5 – latch holder; 6 – the axis of the latch; 7 – a glass for dumping of a hinge plate; 8 – receiving glass; 9 – stopwatch; 10 – technical scales; 11 – heavy

At the beginning of the experiment, the sand from the samples is dried at a standard

temperature of 105°. After which the sand is scattered into fractions. The mass of each single fraction of sand should be 150 g. It is possible to study the morphology of sand grains with a smaller mass of controlled fractions (up to 50–30 g).

However, a decrease in the mass of fractions leads to a decrease in the accuracy of measuring the time of its spilling and also requires adjusting the calculated dependencies.

A hinge plate of each fraction is passed through a funnel and its spilling time is measured. The number of parallel experiments should ensure the determination of a reliable value for the average spilling time of a hinge plate of the sand fraction being studied. It is recommended to conduct at least 10–15 parallel experiments. At the end of the experiment, a control weighing of a hinge plate of the studied sand fraction is carried out.

Primary processing of experimental data is carried out during the experiment. It consists in calculating for each sand fraction the average spilling time of a hinge plate of the studied fraction ($t_{dcp.}$) and the corresponding morphology index of grains of this fraction (λ).

The average spilling time of a hinge plate of the studied sand fraction is determined as the arithmetic mean value of the spilling time from the number of experiments performed.

Table 1

Results of well testing during drilling

Mass of the studied fraction m , g	150	100	50	30
Factor K_1	1	1.3	3.0	5.4

For the purposes of operational geotechnical control over the construction of earthworks from sandy soils, it is recommended to use the following formula, namely:

$$\lambda = A / (K_1 \cdot t_{dcp.} \cdot a) \quad (1)$$

where,

$t_{dcp.}$ – spilling time of a hinge plate of the studied sand fraction, sec;

K_1 – coefficient depending on the mass of the hinge plate in the experiment;

a – coefficient equal to 4.3 with a funnel diameter of 1 cm;

A – a coefficient that generally depends on the size, density of solid particles, and the mass of a hinge plate of the sand fraction being studied (it is accepted from Table 2).

Table 2

The value of the coefficient A for fractions

The density of soil particles, g/cm ³	The value of the coefficient A for different densities of sand fractions, mm				
	0.05...0.	0.1...0.25	0.25...0.5	0.5...1.0	1.0...2.0
2.64	3.32	4.14	5.12	6.55	9.79
2.65	3.31	4.12	5.11	6.54	9.75
2.66	3.30	4.10	5.09	6.50	9.70
2.67	3.28	4.09	5.06	6.49	9.67

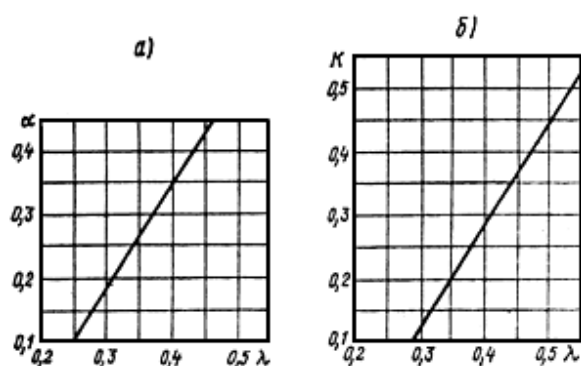


Fig. 2. Graphs of the dependence of the roundness coefficient (a) and the grain shape coefficient (K) on the values of the sand grain morphology index λ

The final processing of experimental data consists of determining the numerical values of (standard) the sand grains shape indices and classifying sands according to grain morphology in a graphical representation of the obtained results. Determining the numerical values of traditional grain shape indices α , β , K is carried out based on correlation dependencies between them and the grain morphology index λ . The value of the sphericity coefficient β is determined by the formula $\beta = K / \alpha$, where α and K is the roundness coefficient and grain shape coefficient, determined from graphs

(see Fig. 2) depending on the value of the grain morphology index λ .

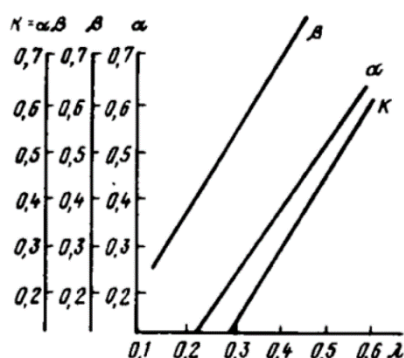


Fig. 3. Dependence of morphological parameters of sand grains of different genesis and composition on the generalized index of morphology λ (according to Potapov A.D.)

To facilitate the identification of sand characteristics, the following combined graph is also proposed (Fig. 3).

Based on morphological characteristics, sands for practical purposes can be divided into two groups according to the degree of processing the grains of the sand fractions as well as additionally into 4 more subgroups – according to the nature of roundness and sphericity of grains of the predominant fraction (Table 3). Also, the morphospecies of sand can be determined by visual observations of grains using a binocular microscope and also from photographs of grains on an electron scanning microscope [5; 6]. Analysis of materials from morphological research on sands in the Valley of Dnipro River.

Table 3

Classification of sand by basic morphological features

Group	Subgroup
I. Unprocessed, $\lambda \leq 0,4$	Angular-non-spherical, $\alpha \leq 0,35$; $\beta \leq 0,8$
	Angular-spherical, $\alpha \leq 0,35$; $\beta > 0,8$
II. Processed, $\lambda > 0,4$	Rounded-non-spherical, $\alpha > 0,35$; $\beta \leq 0,8$
	Rounded-spherical, $\alpha > 0,35$; $\beta > 0,8$

These researches were not the only ones of their kind. Various authors have paid close attention to this issue in previous years. In several types of sands of continental origin of Quaternary age were studied [2; 3; 7; 8]. A morphogenetic series was proposed that described the dependence in the formation of morphological parameters of sands (the degree of processing the sand grains) on the degree of exposure to external factors of particle processing in various conditions: fluvial, eolian, glacial, etc. This series is as follows: eQIV–eoQIV–mQIV – fgQIV – eo-mQIV – aQIV and shows that with increasing degree of impacts during redeposition, the morphology index of sand particles increases. The most characteristic form of sand particles is the form acquired as a result of processing and has minimal surface energy. This shape is a sphere or ellipsoid rotation. This is because, under continental conditions, predominantly quartz sands are formed, less often quartz-feldspar sands. Although oligomictic and even polymictic varieties are found quite often, this is due to the

specific genetic environment of their formation. The predominance of quartz is dictated mainly by its properties, namely its high resistance to weathering, as well as its hardness and resistance to abrasion when transferred in water and air environments. For this reason, quartz grains, with their morphology, can serve as a completely accurate genetic indicator. From the viewpoint of assessing the general morphological features of sands, it is important to take into account the nature of the surface of sand grains. For these purposes, at one time the sand morphology index λ was proposed. This index comprehensively describes the features of the shape and nature of the surface of sand particles in the entire volume of sandy soil under study.

From the sandy deposits of the Dnipro Valley, several genetic varieties of sands were studied, which, as a result of postgenetic processes, acquired different shapes. Table 4 shows the characteristics of the composition and morphological features for the studied sands in the Dnipro Valley.

Table 4

Characteristics of the composition and morphological features of the sands of the Dnipro Valley

Genetic index	Sampling location	Characteristic of granulometric composition	Characteristic of mineral composition	Index of morphology λ	Characteristic of morphology
aQIV	Tripolskaya Thermic Power Plant (TPP)	Small homogeneous	Polymineral	0.449	Processed rounded-spherical, roughly polished, large-sized-pitted
aQIV	Chigirinskaya SDPS	Small homogeneous	Monomineral	0.324	Unprocessed angular-non-spherical, scaly
aQIV	Pridneprovsk, the area of the Samara river mouth	Small homogeneous	Monomineral	no Data Available	The grains are angular, slightly and well-rounded in equal proportions, with a smooth, shiny surface of the sand particles.
aQIV	Dnipro, Monastyrskiy Island	Medium homogeneous	Monomineral	0.210	The grains are classified as unprocessed angular-non-spherical

As can be seen from Table 4, there are no data on the numerical indices for the morphology of all types of sands in the lower reaches of the Dnipro River.

Analysis of previously completed research makes it possible to use the provisions of the V.I. Osipov's work for natural sandy soils of various compositions and morphological features [4]. Several previously published scientific articles have also shown that the morphological features of sands represent an integral structural characteristic of soils. And they largely determine the maximum molecular moisture capacity and the ultimate densities of sands texture. These characteristics, in turn, affect their strength and deformation properties. It has been established that, with different compositions of the liquid filtering through the stratum of sand, they also affect their suffusion stability.

Regarding the strength properties of sands, M.N. Goldstein noted in his works that the shear resistance of sand depends on many components, including the shape of its particles [1]. The shape of the part also affects the behavior of soils under dynamic impacts. At one time, K. Terzaghi noted that the most unstable sands from the viewpoint of liquefaction contain many rounded grains. Valishev I.T. when processing experiments with various sands, obtained a numerical dependence for critical acceleration, which also had the particle shape coefficient. It is known

that construction on eolian sands encounters many difficulties. According to research results, even admixtures of sands of this origin with other soils can seriously deteriorate the deformation and strength properties of the foundation soils of a number of structures, especially for transport and energy purposes [4–9; 11].

Experimental results. Sandy soil samples for laboratory research were taken during the excavation of geophysical (logging) wells near the Zaporizhzhia NPP site. The wells were drilled on the border of the preserved natural relief and the planned territory of the NPP site.

The reactor compartment No. 1 site of the NPP was the closest to the sand sampling points. The bedrock sands of the upper Quaternary horizon in this area are fine quartz, yellow, and yellow-gray, of medium density, water-saturated. The grain composition is dominated by the sand fraction with a particle size of 0.10–0.25 mm in an amount of 33–56 %. Sands in the bulk are homogeneous in grain composition. There are thin layers of sandy loam and silty sand. The density of sand particles in the entire upper horizon is 2.65 g/cm³.

The lower Quaternary stratum in this area usually contain quartz, gray, medium-sized sands, saturated with water, and dense. But in some areas, fine sands again appear in the lower Quaternary strata, indicating the peculiarities of sand deposits' sedimentation in

this area of the “proto-Dnieper” valley. There are lenses of fine and coarse sands. The grain composition of the lower part of the sand stratum is dominated by the 0.25–0.5 mm fraction. The sands are heterogeneous. In the mass of sands there are lenses of quartz, gray, large, heterogeneous sands. The grain composition of coarse sands is dominated by the sand fraction of 0.5–1.0 mm in an amount of 33–42 %. The particle density of the lower horizon is also 2.65 g/cm³.

Processing and analysis of sand samples were carried out by specialists of the soil laboratory at the State Enterprise “DneproGIINTIZ” of the DF State Enterprise “UkrNIINTIZ” (Dnipro) in May 2022. The determined weighted average granulometric composition of the sands in the upper part of the section is given in Table 5.

Table 5

The weighted average particle size distribution of sands in the upper part of the section of the studied stratum

Particle diameter, mm	Fraction content %
2–5	0.3
1–2	0.5
0,5–1	2.4
0,25–0,5	27.7
0,1–0,25	57.5
<0.1	11.6

For analysis, sand samples were taken from the upper and lower horizons. The upper part of the stratum traditionally belongs to eolian-alluvial deposits. The lower part of the stratum presumably belongs to the alluvial horizon.

The fine sands in samples from the upper part of the section are quartz, monomineral, and yellowish-gray. Fine sands in samples from the lower part of the section are quartz, monomineral, and light gray. The sands are homogeneous, but there are also sand bands that are heterogeneous in grain composition. Under a microscope, the surface of individual quartz particles is smooth, shiny, or less often matte.

The sand samples contain isolated inclusions of fine gravel. According to Table 5, fractions of 0.25–0.5 mm and 0.1–0.25 mm predominate. The specialized technical literature informs that determining the

morphological parameters of sands with a fraction of less than 0.1 mm does not make sense. This is because the particles of small fractions are carried in a suspended state and therefore slowly change their shape. It also makes no sense to determine the indices of minor fractions. The use of electron scanning microscopes in mass research is also difficult. Thus, morphological indices are determined only for the predominant fractions of 0.25–0.5 mm and 0.1–0.25 mm. According to formula 1, the numerical values of sand morphology indices for fractions are:

0,25 – 0,5 mm – 0,230;

0,1 – 0,25 mm – 0,191.

To calculate the weighted average value λ_{avg} for fine sands in the upper part of the section for the studied stratum, formula 3 was used (see Appendix 11 to RD 34 15.073-91). The weighted average of grain morphology λ_{avg} for fine sands at the NPP site was 0.204.

According to the complex of morphological parameters, the grains of all fractions in the upper part of the section by the nomograms in Fig. 2 and Table 3, refer to unprocessed ($\lambda \leq 0.4$), angular-non-spherical ($\alpha \leq 0.35$; $\beta \leq 0.8$).

Under a microscope, the surface of individual quartz particles is smooth, shiny, or less often matte. A more in-depth characterization of sand grains of different fractions as per Table 11 “Recommendations for the comprehensive study and assessment of the construction properties of sandy soils” is as follows: fractions of 0.25–0.5 mm and 0.1–0.25 mm by the roundness coefficient a of the grain of the fractions are very angular, by the sphericity coefficient β , they are classified as non-spherical and anisometric, and by the morphology index λ (as very unprocessed).

Based on the difference in the granulometric composition of loose and extremely loose sandy soils at the NPP site, a criterion for their separation has been suggested. In line with this criterion, the boundary between eolian and eolian-alluvial fine sands can be the content of the 0.1–0.25 mm fraction in 65 %.

Fine sands in this area with a content of this fraction of more than 65 % can be

considered eolian. But only under the condition of a significantly lower content of the 0.25–0.5 mm fraction and negligibly small contents of other fractions. This criterion must be taken into account when placing engineering structures.

The overall criteria for identifying purely eolian sands in the Enerhodar region in the upper horizon of the sandy Quaternary alluvial strata can be as follows:

- content of fraction 0.1–0.25 mm is more than 65 %;
- absence of fractions is more than 0.5 mm and less than 0.05 mm;
- morphology index λ is not less than 0.20;
- the roundness coefficient is $\alpha \leq 0.35$;
- the sphericity coefficient is $\beta \leq 0.8$.

The angularity of the fragments in the studied sands may well be observed in deposits of eolian genesis as well as the absence of the clay fraction in the sands. The angularity of fragments is influenced by many factors: particle size, type of particle movement, wind speed and its direction, and duration of wind processes. An example is the sands of the Sahara Desert, which are distinguished by the obvious angularity of the grains.

The weighted average particle size distribution of sands in the lower part of the section of the studied stratum is given in Table 6.

According to formula 1, the numerical values of the sand morphology indices λ for individual fractions are: 0.25 – 0.5 mm – 0.232; 0.1 – 0.25 mm – 0.184.

To calculate the weighted average value λ_{avg} for fine sands in the lower part of the

section of the studied strata, formula 3 was also used (see Appendix 11 to RD 34 15.073-91). For sand samples according to Table 6, the weighted average of grain morphology λ_{avg} for fine sands of the NPP site was 0.200.

Table 6

The weighted average particle size distribution of sands in the upper part of the section of the studied stratum

Particle diameter, mm	Fraction content %
2–5	–
1–2	–
0.5–1	2.3
0.25–0.5	28.3
0.1–0.25	59.3
< 0.1	10.1

According to the nomograms in Fig. 2 and Table 3 grains of all fractions of this sand in the lower part of the section are unprocessed ($\lambda \leq 0.4$), angular-non-spherical ($\alpha \leq 0.35$; $\beta \leq 0.8$). Under a microscope, the surface of individual quartz particles is smooth, shiny, or less often matte.

A more in-depth characterization of sand grains of different fractions following of Table 11 “Recommendations for the comprehensive study and assessment of the construction properties of sandy soils” [9] is as follows: grains of the 0.25–0.5 mm and 0.1–0.25 mm fraction is very angular according to the roundness coefficient α , according to the sphericity coefficient β they are classified as non-spherical and anisometric, and according to the morphology index λ – as very unprocessed.

The research results are presented in Table 7.

Table 7

The value of morphology λ for sand fractions in different parts of the Dnipro Valley

Title and sand gradation	Sand sampling location	The value of the morphology index λ for sand fractions				
		0.1...0.25	0.25...0.5	0.5...1.0	1.0...2.0	weighted average
Alluvial sand, mean size	Monastery Island, Dnipro city	0.196	0.210	0.250	–	0.210
Sand, eolian-alluvial, fine, upper horizon	Zaporizhzhia NPP site	0.191	0.230	–	–	0.204
Alluvial sand, fine, lower horizon	The same place	0.184	0.232	–	–	0.200

As follows from Tables 5 and 6, the indicators of sieving sand samples from the upper and lower horizons of the sand mass are

not very different from each other. Also, according to Table 6, the morphological parameters of individual sand fractions are

similar. A feature of the fine sands in the study area is not only the actual two fractions (0.1–0.25 mm and 0.25–0.5 mm) but the closeness of the flow rates of sand hinge plate for the indicated fractions through a glass funnel, that had been revealed during laboratory experiments. All these points out the similar conditions for the formation of these geological layers and their probable belonging not to different, but to one type of deposit – eolian-alluvial. This, in particular, distinguishes the fine sands of the Enerhodar region from the usual medium-sized alluvial sands of Monastyrskiy Island in the Dnipro city (Dnipropetrovsk), which were subjected to similar research.

The values of some characteristics of the physical and mechanical properties of fine sands were calculated using the obtained values of the morphology index λ based on the nomograms in paragraph 2.23 of Figure 14 “Recommendations for a comprehensive study and assessment of the construction properties of sandy soils” [9]. The obtained values are largely similar to the data from engineering surveys at the site. But except for the lower adhesion index inherent in the sandy soils of the upper horizon at the NPP site: 0.025 MPa according to nomograms versus 0.01 MPa or less. However, these differences can be explained by the genesis of the deposits themselves. It should be especially noted that it is very difficult to use these nomograms with values of the morphology index of 0.2 or less.

Also noteworthy is the rather significant content of the finely dispersed component in the samples. This directly affects the cohesion and internal friction in the sand mass. For this reason, some kinds of quicksand-thixotropic phenomena are quite possible in the sands of the upper horizon. They may be due to the presumably plasticized-coagulation type of structural bonds. With this type of bond, sands can easily liquefy during vibration [5]. But to confirm these assumptions, special additional research is necessary.

Originality and Practical value. The originality of this work can be considered the obtaining of numerical parameters of the morphology of aeolian-alluvial and alluvial

sands of the Zaporizhzhia NPP site for the first time in a vertical section. The obtained numerical values supplemented the data missing in Table 3. One can confidently note a downward trend in the morphology index of the river sands of the Dnieper Valley from the source to the mouth. The genesis of sands also affects the morphology index. Based on the identified differences in the granulometric composition of loose and extremely loose sands in the upper part of the geological section, a genetic criterion for their separation can be proposed. According to this criterion, the content of the 0.1–0.25 mm fraction of 65 % can serve as the conventional boundary between aeolian and aeolian-alluvial fine sands of the region, with a sharply subordinate value of other fractions. Above the fraction content of 65 %, the fine sands of the site clearly belong to aeolian varieties.

The value of the morphology index for purely aeolian sands in the area should be at least 0.2. But this assumption needs to be checked with mass determinations. The previously stated assumption about the good roundness of the sands of the upper part of the section in this section of the Dnieper Valley was not confirmed. However, it should be noted that all the studies performed are still, in fact, point-by-point. To confirm the data obtained, it seems necessary to conduct additional studies of the sands of the entire nuclear power plant site. It is mandatory to study the morphological features of medium sands of deep horizons. And also conduct massive research in the Kakhovka region (especially carefully in the area of the destroyed hydroelectric power station) and Kherson. To accurately establish the interface boundaries between sands of different origins, it is necessary to clarify the process of sampling sand from exploration wells. It is necessary to increase the number of testing intervals along the wellbore and the volume of samples. The sample weight of sand dried to constant weight for morphological studies must be at least 5 kg.

The practical value of the research was to obtain numerical indicators of the morphology of the sands in this area. Genetic criteria for identifying aeolian and aeolian-alluvial sands at

the top of the local section were also proposed. This may explain the reasons for the unstabilized settlements of some buildings and structures of NPP over a long period of time. Also, determining the numerical indices of the morphology of eolian-alluvial sands at a NPP site can help predict the behavior of hydraulic structures built on them under external stress impacts. These may also include a sudden short-term significant increase or decrease in the level of the Kakhovka Reservoir (including due to damage to the dams of the Dnipro cascade). This is what happened in practice, as a result of the destruction of the Kakhovska hydroelectric power station dam. However, this problem requires a separate study, given the supposed similarity of the sandy soils of the hydroelectric power station area with the soils of the NPP site. In particular, to identify a possible connection between the stability of buildings and structures of hydroelectric power stations and the quality of the sandy soils of their foundations.

Conclusion

In the course of the conducted research on sand samples, it was found that the weighted average morphology index for fine eolian-alluvial sands in the upper part of the section at the Zaporizhzhia NPP site is 0.204. For fine, presumably alluvial sands in the lower part of the section, it is 0.200. According to the main morphological characteristics, the grains of all main sand fractions are classified as unprocessed, angular-non-spherical. The results of similar works on the study of genetic types of Quaternary sands of the different genesis in the Dnipro Valley were also analyzed. During

this, data were obtained on the morphology of monomineral oligomict alluvial sands, the shape and nature of the surface of alluvial sand grains. It should be noted that some morphological characteristics of river Quaternary sands of the Dnipro Valley for this area were obtained for the first time. Further research involves studying the river sands of the Dnipro Valley from deeper horizons.

The originality of these research is the obtaining of numerical morphological parameters for eolian-alluvial and alluvial sands at the Zaporizhzhia NPP site. This is for the first time and in a vertical section. One can note the previously identified trend of a decrease in the morphology index of the river sands of the Dnipro Valley from the sources to the mouth. The dependence of the morphology index on the genesis of sediments was also confirmed.

The practical value of the research was that in addition to obtaining numerical indices of morphology, criteria for identifying eolian and aeolian-alluvial sands in the upper part of the local geological section were proposed. This may explain the reasons for the long-term unstabilized settlements of individual buildings and structures of NPP. The results of the research can be implemented to calculate the indices of sandy soils at the foundations of buildings and structures. And also, they can be used in calculations during the post-war reconstruction of hydraulic structures of energy facilities in the Dnipro Valley – cooling ponds of nuclear power plants and thermal power plants, various dams, and ground approaches to transport structures.

REFERENCES

1. Goldstein M.N. *Mekhanicheskiye svoystva gruntov (napryazhonno-deformatsionnyye i prochnostnyye kharakteristiki)* [Mechanical properties of soils (stress-strain and strength characteristics)]. 1979, 304 p. (in Russian).
2. Kukhar V.Yu. and Ziborov A.P. *O neobkhodimosti nauchnogo obespecheniya perevoda na bol'shiye glubiny dobychnykh rabot na mestorozhdeniyakh stroitel'nykh materialov shel'fa Chornogo morya* [On the need for scientific support for the transfer to great depths of mining operations at the deposits of building materials of the Black Sea shelf]. *Geologiya i korisni kopalini svitovogo okeanu* [Geology and Correspondence of the Copalini of the Light Ocean]. 2007, no. 1 (7), pp. 120–130. (in Russian).
3. Potapov A.D. *Morfologicheskoye izucheniye peskov v inzhenerno-geologicheskikh tselyakh : diss. ... kand. geol.-mineral. nauk* [Morphological study of sands for engineering-geological purposes : diss. ... cand. geol.-mineral. sc.]. Moscow : PIIS, 1981, 243 p. (in Russian).

4. *Rekomendatsii po kompleksnomu izucheniyu i otsenke stroitel'nykh svoystv peschanykh gruntov* [Recommendations for a comprehensive study and assessment of the building properties of sandy soils]. PNIIS, MISI im. Kuibyshev, 1984, 212 p. (in Russian).
5. Slyusarenko S.A., Stepanenko G.N., Glotova M.A. and Novikov M.F. *Proyektirovaniye i ustroystvo fundamentov na namyvnykh peschanykh gruntakh* [Design and installation of foundations on alluvial sandy soils]. Kyiv: Budivelnik Publ., 1990, 128 p. (in Russian).
6. Ulyanov V.Yu. The results of morphological evaluation of some features of alluvial sands of the city of Dnipro. *Science and Progress of Transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2021, no. 6 (96), pp. 95–104. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2021/256577>
7. Bely L.D, Doudler I.V., Mosiakov E.F., Potapov A.D. and Julin A.N. Research Methods and Evaluation of Various Genesis Sand Grain Morphology Role in Formation of Their Geological-engineering Properties. *Bulletin of IAEG*. Krefeld, 1975, no. 11, pp. 27–31.
8. Doudler I.V., Mosiakov E.F. and Potapov A.D. Influence of Characteristic Moisture Content Values on Physical-chemical Properties of Sands of Various Genesis. *Moscow Institute of Civil Engineering*. No. II, April 1974, pp. 14–17.
9. Huang Yamei and Wang Lihua. Effect of Particle Shape of Limestone Manufactured Sand and Natural Sand on Concrete. *Procedia Engineering*. January 2017, no. 210, pp. 87–92. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.11.052.
10. Yunhu Xie, Xiaohong Dang, Yujuan Zhou, Zhihui Hou, Xiaojia Li, Hongtao Jiang, Dandan Zhou, Ji Wang, Chunxing Hai and Ruiping Zhou. Using sediment grain size characteristics to assess effectiveness of mechanical sand barriers in reducing erosion. *Scientific Reports*. 2020, no. 10, p. 14009. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71053-3>
11. Fepy Supriani, Mukhlis Islam and Yuzuar Afrizal. Sand type characteristics analysis and mapping in Bengkulu. *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science*. 2019, no. 314, p. 012058. DOI: 10.1088/1755-1315/314/1/012058.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов (напряжённо-деформационные и прочностные характеристики). 1979. 304 с.
2. Кухарь В. Ю., Зиборов А. П. О необходимости научного обеспечения перевода на большие глубины добычных работ на месторождениях строительных материалов шельфа Чёрного моря. *Геологія і корисні копалини світового океану*. 2007. № 1 (7). С. 120–130.
3. Потапов А. Д. Морфологическое изучение песков в инженерно-геологических целях : дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. Москва : ПНИИИС, 1981. 243 с.
4. Рекомендации по комплексному изучению и оценке строительных свойств песчаных грунтов. ПНИИИС, МИСИ им. Куйбышева, 1984. 212 с.
5. Слюсаренко С. А., Степаненко Г. Н., Глотова М. А., Новиков М. Ф. Проектирование и устройство фундаментов на намывных песчаных грунтах. Київ : Будівельник, 1990. 128 с.
6. Ulyanov V. Yu. The results of morphological evaluation of some features of alluvial sands of the city of Dnipro. *Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*. 2021. № 6 (96). Pp. 95–104. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2021/256577>
7. Bely L. D., Doudler I. V., Mosiakov E. F., Potapov A. D., Julin A. N. Research Methods and Evaluation of Various Genesis Sand Grain Morphology Role in Formation of Their Geological-engineering Properties. *Bulletin of IAEG*. Krefeld, 1975. № 11. Pp. 27–31.
8. Doudler I. V., Mosiakov E. F., Potapov A. D. Influence of Characteristic Moisture Content Values on Physical-chemical Properties of Sands of Various Genesis. *Moscow Institute of Civil Engineering*. № II. April, 1974. Pp. 14–17.
9. Huang Yamei, Wang Lihua. Effect of Particle Shape of Limestone Manufactured Sand and Natural Sand on Concrete. *Procedia Engineering*. January 2017, № 210. Pp. 87–92. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.11.052.
10. Yunhu Xie, Xiaohong Dang, Yujuan Zhou, Zhihui Hou, Xiaojia Li, Hongtao Jiang, Dandan Zhou, Ji Wang, Chunxing Hai & Ruiping Zhou. Using sediment grain size characteristics to assess effectiveness of mechanical sand barriers in reducing erosion. *Scientific Reports*. 2020. № 10. P. 14009. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71053-3>
11. Fepy Supriani, Mukhlis Islam, Yuzuar Afrizal. Sand type characteristics analysis and mapping in Bengkulu. *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science*. 2019. № 314. P. 012058. DOI: 10.1088/1755-1315/314/1/012058.

Надійшла до редакції: 12.02.2025.

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 06.05.2025 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. 214

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 May 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 214