

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

№ 1 (025)
січень – лютий 2025

Дніпро 2025

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор	Микола САВИЦЬКИЙ, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро
Заступник головного редактора	Владислав ДАНІШЕВСЬКИЙ, 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'яно, 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. Налісько, 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. Седін, 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 № 8 від 26.02.2025.

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 МОЇСЕСНКО
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

№ 1 (025)
January – February 2025

Dnipro 2025

EDITORIAL STAFF :

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

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. Kirichuk, 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, *Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih*. V. P. Myronenko, Doctor of Architecture, *O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv*. M. M. Nalysko, Doctor of Engineering Science, *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 Korjakins, Doctor of Engineering Science, *Riga Technical University, Riga, Latvia*. V. I. Kuksenko, PhD, Candidate of Engineering Science, *UK Atomic Energy Authority, Oxford, UK*. Boguslaw Podhalyanski, Doctor of Architecture, *Cracow University of Technology, Cracow (Poland)*.

Scientific-Practical Journal is included in	List of scientific professional publications of Ukraine (category "B"), where the results of dissertations for the degree of Doctor and Candidate of Engineering Sciences and Architecture (by specialty 132, 191, 192, 194, 263) can be published according to the Resolution of the Ministry of Science and Education of Ukraine No. 157 dated 09.02.2021 (Appendix no. 3).
Certificate of State Registration	of the Print Media – Series KB No. 24586-14526 ПІП – 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. 8 from 26.02.2025
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 Serhii MOISEIENKO</i> <i>Editor & Proofreader Valentyna MALOVYK</i>

У ЦЬОМУ НОМЕРІ

Бекетов О. В., Лаухін Д. В., Осипчук М. М., Зваричук З. В., Нестеркін О. О. ДОСЛІДЖЕННЯ ТОНКОЇ СТРУКТУРИ ПРОДУКТІВ ПРОМІЖНОГО ТА ЗСУВНОГО МЕХАНІЗМІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ АУСТЕНИТУ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ.....	7
Бекетов О. В., Лаухін Д. В., Осипчук М. М., Помазан А. Р., Радько О. В. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРИСКОРЕННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА КІНЕТИКУ РУЙНУВАННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ.....	17
Беліков А. С., Колесник І. О., Тищенко О. М., Смирнов Є. Д. ЗАСТОСУВАННЯ НЕТРАДИЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ОБ'ЄКТІВ УКРАЇНИ.....	25
Беліков А. С., Слащов І. М., Коротаєв В. М., Барабанов С. С., Демченко В. В. УДОСКОНАЛЕННЯ ВІБРОАКУСТИЧНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЮ ПОШКОДЖЕНОСТІ ГЕОТЕХНІЧНИХ СПОРУД.....	31
Беліков А. С., Стрежекуров Ю. Е. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ КАМЕРИ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ НА РОБОЧИХ МІСЦЯХ.....	40
Беліков А. С., Тодоров О. П., Крекнін К. А., Харченко В. В., Яворська О. О. ВПЛИВ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	47
Біляєв М. М., Берлов О. В., Козачина В. А., Машихіна П. Б., Тимошенко О. А. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗАХИСНИХ БАР'ЄРІВ НА ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ ЗАХВОРЮВАНЬ У ПРАЦІВНИКІВ.....	57
Бондаренко А. В., Юрченко Є. Л. МЕТОД ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКА ІНФІЛЬТРАЦІЇ.....	64
Бородін М. О., Ткач Т. В., Мартиш О. О. ОРГАНІЗАЦІЙНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В БУДІВНИЦТВІ.....	73
Варченко Ю. Е. НОВІ СПОСОБИ РОЗРОБКИ ТИПОГРАФІЧНОГО ПОРТРЕТУ В РЕДАКТОРАХ РАСТРОВОЇ ГРАФІКИ ADOBE PHOTOSHOP ТА ВЕКТОРНОЇ ГРАФІКИ ADOBE ILLUSTRATOR.....	81
Гладюк О. М., Болібрух Б. В., Сторонський М. О. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ТРАВМУВАННЯ ПРАЦЮЮЧИХ НА БУДІВНИЦТВІ.....	89
Зайко О. М., Заяць Є. І. АНАЛІЗ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ БУДІВНИЦТВА МАЛОПОВЕРХОВИХ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ З УРАХУВАННЯМ РАЦІОНАЛЬНОГО СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ.....	97
Сухий К. М., Беліков А. С., Пилипенко О. В., Рибалка К. А., Андреева А. В. ЗМІНИ В ПІДХОДАХ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ЗГІДНО РЕКОМЕНДАЦІЙ МІЖНАРОДНОЇ КОМІСІЇ З РАДІАЦІЙНОГО ЗАХИСТУ.....	106
Яланський О. А., Кириченко О. В., Слащова О. А., Барабанов С. С., Бриженюк В. С. ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ ВІБРОАКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ.....	117
Седін В. Л., Ульянов В. Ю., Ковба В. В., Загільський В. А., Бікус К. М., Білик В. В. ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ РОЗЛОМНИХ ЗОН ДОКЕМБРІЙСЬКОГО КРИСТАЛИЧНОГО ФУНДАМЕНТУ МАЙДАНЧИКА ЗАПОРІЗЬКОЇ АЕС НА ОСНОВІ ВИМІРУ РАДОНУ.....	128

CONTENT

Beketov O.V., Laukhin D.V., Osypchuk M.M., Zvarychuk Z.V., Nesterkin O.O. STUDY OF THE FINE STRUCTURE OF THE PRODUCTS OF THE INTERMEDIATE AND SHEAR MECHANISMS OF AUSTENITE TRANSFORMATION OF LOW-CARBON LOW-ALLOY STEEL.....	7
Beketov O.V., Laukhin D.V., Osypchuk M.M., Pomazan A.R., Radko O.V. STUDY OF THE INFLUENCE OF ACCELERATED COOLING ON THE KINETICS OF DESTRUCTION OF LOW-CARBON LOW-ALLOY STEELS.....	17
Bielikov A.S., Kolesnyk I.O., Tyshchenko O.M., Smirnov Ye.D. APPLICATION OF NON-TRADITIONAL ENERGY SOURCES TO ENSURE THE SECURITY OF VITAL ACTIVITIES OF UKRAINE FACILITIES.....	25
Bielikov A.S., Slashchov I.M., Korotaiev V.M., Barabanov S.S., Demchenko V.V. IMPROVING THE VIBROACOUSTIC METHOD FOR CONTROL OF DAMAGE TO GEOTECHNICAL STRUCTURES.....	31
Bielikov A.S., Strezhekurov Yu.E. IMPROVEMENT OF THERMAL IMAGING CAMERA FOR ASSESSING HEAT FLOW IN WORKPLACES.....	40
Bielikov A.S., Todorov O.P., Kreknin K.A., Harchenko V.V., Yavorska O.O. THE IMPACT OF HIGH TEMPERATURES ON THE LOAD-BEARING CAPACITY OF WOODEN STRUCTURES.....	47
Biliaiev M.M., Berlov O.V., Kozachyna V.A., Mashykhina P.B., Tymoshenko O.A. RESEARCH OF THE INFLUENCE OF PROTECTIVE BARRIERS ON REDUCING THE RISK OF ILLNESSES IN WORKERS.....	57
Bondarenko A.V., Yurchenko Yevh.L. METHOD OF INSTRUMENTAL ASSESSMENT OF THE INFILTRATION INDICATOR.....	64
Borodin M.O., Tkach T.V., Martysh O.O. ORGANIZATIONAL ASPECTS OF THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CONSTRUCTION.....	73
Varchenko Yu.E. NEW WAYS TO DESIGN A TYPOGRAPHIC PORTRAIT IN ADOBE PHOTOSHOP RASTER AND ADOBE ILLUSTRATOR VECTOR GRAPHICS EDITORS.....	81
Hladiuk O.M., Bolibrukh B.V., Storonskyi M.O. RESEARCH OF THE CAUSES OF INJURIES TO CONSTRUCTION WORKERS.....	89
Zaiko O.M., Zaiats Yev.I. ANALYSIS OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN LOW-RISE RESIDENTIAL CONSTRUCTION CONSIDERING RATIONAL ENERGY CONSUMPTION.....	97
Sukhyi K.M., Bielikov A.S., Pylypenko O.V., Rybalka K.A., Andrieieva A.V. CHANGES IN APPROACHES TO ENSURING RADIATION SAFETY ACCORDING TO THE RECOMMENDATIONS OF THE INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION PROTECTION.....	106
Yalanskyi O.A., Kyrychenko O.V., Slashchova O.A., Barabanov S.S., Brizheniuk V.S. FEATURES OF IMPLEMENTATION OF THE SPECTRAL ANALYSIS METHOD FOR PROCESSING VIBROACOUSTIC CONTROL DATA.....	117
Sedin V.L., Ulyanov V.Yu., Kovba V.V., Zahilskyi V.A., Bikus K.M., Bilyk V.V. ON THE QUESTION OF DETERMINING THE ACTIVITY OF FAULT ZONES OF THE PRECAMBRIAN CRYSTALLINE FOUNDATION AT THE ZAPORIZHZHIA NPP SITE BASED ON RADON MEASUREMENTS.....	128

УДК 620.181.4:691.714

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.7.1123

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОНКОЇ СТРУКТУРИ ПРОДУКТІВ ПРОМІЖНОГО ТА ЗСУВНОГО МЕХАНІЗМІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ АУСТЕНІТУ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

БЕКЕТОВ О. В.^{1*}, *докт. техн. наук, доц.*,
ЛАУХІН Д. В.², *докт. техн. наук, проф.*,
ОСИПЧУК М. М.³, *канд. ф.-м. наук, доц.*,
ЗВАРИЧУК З. В.⁴, *маг.*,
НЕСТЕРКІН О. О.⁵, *асп.*

^{1*} Кафедра фундаментальних і природничих дисциплін, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 604-61-86, e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

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

³ Кафедра фундаментальних і природничих дисциплін, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 831-65-76, e-mail: osypchuk.mykola@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1524-5479

⁴ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: anesterkin80@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-0863-2596

⁵ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: anesterkin80@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-5630-8440

Анотація. Повоєнне відновлення України буде вимагати збільшення масштабів виробництва металопрокату для будівельної індустрії. Застосування сталей високої міцності в будівельній промисловості, є основною причиною появи підвищених вимог до цих сталей. При цьому, слід зауважити, що починаючи з 80-х років минулого століття закордонними виробниками для будівельних металокопункцій виготовляється металопрокат за технологічними схемами, які містять застосування прискореного охолодження. Використання саме цієї технологічної дозволяє досягти більш високого рівня експлуатаційних властивостей (порівняно з класичною контрольованою прокаткою) за рахунок заміни у структурі металопрокату перлітної фази на дисперсну бейнітну складову. Отже, актуальною є задача дослідження морфологічних особливостей структурного стану, якій формується в низьковуглецевих низьколегованих сталях при застосування прискореного охолодження в технологічній схемі виробництва. **Мета статті** – дослідження морфології структурних складових, які формуються в низьковуглецевих низьколегованих сталях внаслідок дії проміжного та/або зсувного механізмів перетворення переохолодженого аустеніту. **Висновок.** Досліджено морфологію структурних складових, які формуються в низьковуглецевих низьколегованих сталях внаслідок дії проміжного та зсувного механізмів перетворення переохолодженого аустеніту. Встановлено, що термічна обробка в температурному інтервалі 550...450 °C з витримкою 20 хвилин призводить до формування в структурі низьковуглецевих низьколегованих сталей бейніту різної морфологічної форми (верхній бейніт та голчастий ферит) та рейкового дислокаційного мартенситу (спостерігається при температурі витримки 450 °C). З застосуванням мікродифракційного аналізу показано, що границя між двома колоніями верхнього бейніту має структуру, яка відповідає границям спеціального типу. Сумісний аналіз даних мікродифракційних та темнопольних досліджень показав, що в пакетах голчастого фериту (температура витримки 500 °C) між рейками фериту знаходиться лише залишковий аустеніт. Разом з цим, в колоніях рейкового дислокаційного мартенситу між рейками одночасно з залишковим аустенітом присутня також карбонітридна фаза. Проведений комплекс досліджень показав, що відмінності в морфології структурних складових, які формуються під час витримки в температурному інтервалі 550...450 °C обумовлені, в першу чергу, різницею в швидкостях і, як наслідок, обмеженнях протікання процесів зсуву кристалічної решітки. Чим вище температура перетворення, тим більша дифузійна активність атомів, тим менша швидкість зсувного перетворення γ -Fe в α -Fe.

Ключові слова: *структурний стан; прискорене охолодження; верхній бейніт; голчастий ферит; рейковий дислокаційний мартенсит; мікродифракційна картина; темнопольний режим*

STUDY OF THE FINE STRUCTURE OF THE PRODUCTS OF THE INTERMEDIATE AND SHEAR MECHANISMS OF AUSTENITE TRANSFORMATION OF LOW-CARBON LOW-ALLOY STEEL

BEKETOV O.V.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
LAUKHIN D.V.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
OSYPCHUK M.M.³, *Cand. Sc. (Phys. and Math.), Assoc. Prof.*,
ZVARYCHUK Z.V.⁴, *Master's degree*,
NESTERKIN O.O.⁵, *PhD Stud.*

^{1*} Department of Fundamental and Natural Sciences, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 604-61-86, e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

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

³ Department of Fundamental and Natural Sciences, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 831-65-76, e-mail: osypchuk.mykola@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1524-5479

⁴ Department of Materials Science and Processing, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 650-90-22, e-mail: anesterkin80@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-0863-2596

⁵ Department of Materials Science and Processing, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 650-90-22, e-mail: anesterkin80@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-5630-8440

Abstract. The post-war recovery of Ukraine will require an increase in the scale of production of rolled metal for the construction industry. The use of high-strength steels in the construction industry is the main reason for the emergence of increased requirements for these steels. At the same time, it should be noted that since the 80s of the last century, foreign manufacturers have been producing rolled metal for building metal structures according to technological schemes that include the use of accelerated cooling. The use of this particular technology makes it possible to achieve a higher level of operational properties (compared to classical controlled rolling) by replacing the pearlite phase in the structure of the rolled metal with a dispersed bainite component. Therefore, the task of researching the morphological features of the structural state, which is formed in low-carbon, low-alloy steels when using accelerated cooling in the technological scheme of production, is relevant. **Purpose of the article.** study of the morphology of structural components that are formed in low-carbon, low-alloy steels as a result of the action of intermediate and/or shear mechanisms of transformation of supercooled austenite. **Conclusion.** The morphology of the structural components that are formed in low-carbon, low-alloy steels as a result of the action of the intermediate and shear mechanisms of transformation of supercooled austenite has been studied. It was established that heat treatment in the temperature range of 550...450 °C with a holding time of 20 minutes leads to the formation of bainite of different morphological forms (upper bainite and acicular ferrite) and rack dislocation martensite (observed at a holding temperature of 450 °C) in the structure of low-carbon, low-alloy steels. With the use of microdiffraction analysis, it is shown that the boundary between two colonies of upper bainite has a structure that corresponds to the boundaries of a special type. Combined analysis of the microdiffraction and dark-field data showed that only residual austenite is found between the ferrite rails in the acicular ferrite packets (holding temperature 500 °C). Along with this, the carbonitride phase is also present in the colonies of rail dislocation martensite between the rails simultaneously with residual austenite. The conducted set of studies showed that the differences in the morphology of the structural components, which are formed during exposure in the temperature range of 550...450 °C, are caused, first of all, by the difference in the speeds and, as a result, the limitations of the crystal lattice shift processes. The higher the transformation temperature, the greater the diffusion activity of atoms, the lower the rate of shear transformation of γ -Fe into α -Fe.

Keywords: *structural condition; accelerated cooling; upper bainite; acicular ferrite; rail dislocation martensite; microdiffraction pattern; dark field mode*

Постановка проблеми. Повоєнне завдання підвищення якості відновлення України буде вимагати металопродукції, різкого зниження відходів збільшення масштабів виробництва металу при його виробництві й обробці. Застосування сталей високої міцності в цьому сенсі, на перший план виходить будівельній промисловості, є основною

причиною появи підвищених вимог до цих сталей.

При цьому, слід зауважити, що починаючи з 80-х років минулого століття закордонними виробниками для будівельних металоконструкцій виготовляється металопрокат за технологічними схемами, які містять застосування прискореного охолодження [1].

На рисунку 1 приведена схема залежності властивостей металопрокату для будівельних металевих конструкцій від застосування різних технологічних схем виробництва з застосуванням прискореного охолодження (див. роботу [2]).

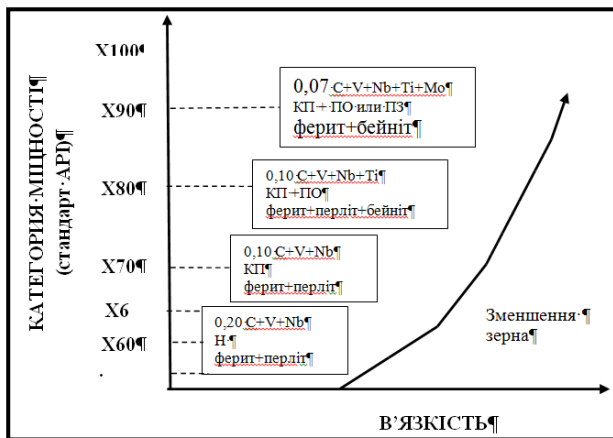


Рис. 1. Переваги технології прискореного охолодження [2]

Як свідчать наведені на рис. 1 дані, застосування технологічної схеми контрольована прокатка з наступним прискореним охолодженням володіє значними перевагами перед іншими способами збільшення міцності конструкційних листових сталей. Використання саме цієї технологічної схеми дозволяє досягти більш високого рівня експлуатаційних властивостей (порівняно з класичною контрольованою прокаткою) за рахунок заміни у структурі металопрокату перлітної фази на дисперсну бейнітну складову. Отже, актуальною є задача дослідження морфологічних особливостей структурного стану, якій формується в низьковуглецевих низьколегованих сталях при застосування прискореного охолодження в технологічній схемі виробництва.

Аналіз публікацій. Контрольована прокатка та її різновиди є одним із найпоширеніших видів термомеханічної обробки низьколегованих сталей. Технологічна схема класичної контрольованої прокатки включає контроль температури початку та завершення деформації, обтискання та швидкості охолодження на різних стадіях пластичної обробки [3]. Однією з особливостей контрольованої прокатки є прокатка металу в чистовій клітці при температурі фазових перетворень, в міжкритичному інтервалі температур. Класична технологія контрольованої прокатки передбачає чистову прокатку до заданої товщини при температурах 750...775 °С за 5...7 пропусків. Таким чином, чистова прокатка відбувається у двохфазній ($\gamma + \alpha$) області [4].

Застосовуючи прискорене охолодження від температур кінця чистової прокатки можна досягти подрібнення зерна, оскільки більш низька температура початку перетворення забезпечує більше зародків у переохоложеному аустеніті. Таким чином, в той час коли охолодження конструкційної сталі на повітрі забезпечує отримання ферито-перлітної структури, перерване прискорене охолодження попереджує перетворення γ -фази в перліт та призводить до утворення мікроструктури, яка складається з фериту та бейніту [5] (див. рис. 2).

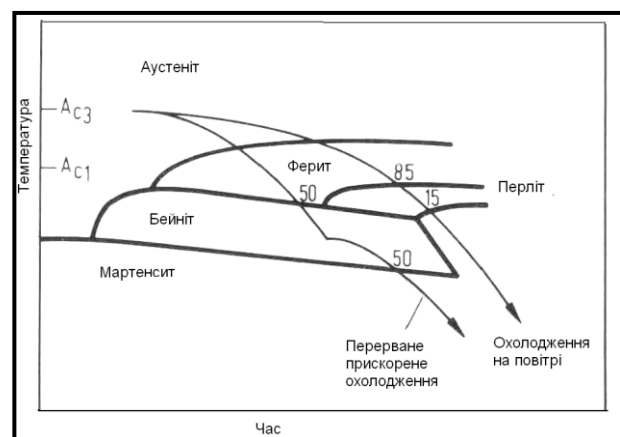


Рис. 2. Режими охолодження [5]

В умовах виробництва використовується комбінація термомеханічної прокатки з перерваним прискореним охолодженням.

Типове, прискорене охолодження припиняється при температурі ~ 500 °С і в подальшому охолодження виконується на повітрі. При вказаному режимі охолодження в мікроструктурі сталі повинно міститися порядку 50 % бейнітної складової разом з ферито-мартенситний конгломератом в різному відсотковому співвідношенні [6] (в залежності від швидкості охолодження, яку було використано в технологічному процесі).

Мета статті – дослідження морфології структурних складових, які формуються в низьковуглецевих низьколегованих сталях внаслідок дії проміжного та/або зсувного механізмів перетворення переохолодженого аустеніту.

Результати досліджень. У якості матеріалу для дослідження було обрано низьковуглецеву низьколеговану сталь 10Г2ФБ. Базуючись на встановлених температурно-часових інтервалах розпаду переохолодженого аустеніту [7] для сталі 10Г2ФБ, була проведена термічна обробка з окремого нагріву зразків сталі 10Г2ФБ за режимом, який наведено на рисунку 3.

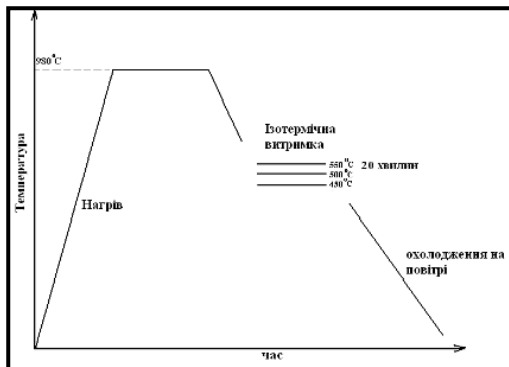


Рис. 3. Схема експериментальної обробки зразків зі сталі 10Г2ФБ

Даний режим термічної обробки включає в себе нагрів до температури аустенізації (980 °С), витримку у γ -ділянці протягом 1 хвилини на 1 мм перерізу (розчин спеціальних карбідів), прискорене охолодження (25 °С/с) до температури утворення в структурі досліджуваного металу максимальної кількості продуктів зсувного перетворення аустеніту (500 °С), витримку при даній температурі протягом 20 хвилин та наступне охолодженням на

спокійному повітрі. Для порівняння морфологічних особливостей структурного стану були проведені експериментальні обробки досліджуваного металу за аналогічними режимами в нижній частині температурного інтервалу ферито-бейнітного перетворення (550 °С) та верхній частині температурного інтервалу бейнітно-мартенситного перетворення (450°С) з витримкою 20 хв.



а ($\times 500$)



б ($\times 500$)



в ($\times 500$)

Рис. 4. Мікроструктура сталі 10Г2ФБ після витримки на протязі 20 хвилин при температурах: а – 550 °С; б – 500 °С; в – 450 °С

Проведений комплекс металографічних досліджень зразків (див. рис. 4) показав, що термічна обробка за запропонованими режимами призводить до формування в структурі сталі 10Г2ФБ різноманітних морфологічних типів бейніту та пакетного низьковуглецевого мартенситу.

Подальше дослідження тонкої структури продуктів проміжного чи зсувного перетворення здійснювали методом електронної мікроскопії на просвіт (методом тонкої фольги), згідно рекомендацій роботи [8]. Комплекс кристалографічних досліджень виконували шляхом мікродифракційного аналізу. Розрахунок відповідних мікродифракційних картин виконували згідно рекомендацій [9]. Зображення в косому освітленні (темнопольний режим роботи мікроскопу) отримували згідно рекомендацій [10].

Проведений комплекс досліджень показав, що основною структурою, яка формується при температурі 550 °С та витримці у 20 хвилин є верхній бейніт (рис. 5 а). Верхній бейніт – це структура сплавів заліза, що утворюється з переохолодженого аустеніту в верхньому інтервалі температур бейнітного перетворення.

В верхньому бейніті частки карбідів розміщені по границям зерен чи по границям та всередині феритної фази бейнітної колонії. Феритна складова у верхньому бейніті наявна у вигляді рейок товщиною менш ніж 1 мкм та довжиною 5...10 мкм.

На рисунку 5 а наведено знімок на якому представлено дві колонії бейнітних рейок з різними напрямками росту та границю їх поєднання. На даному рисунку колами позначені місця дифракції електронів. Мікродифракційні картини першої (рис. 5 б) та третьої (рис. 5 в) ділянок зняті з місць безпосереднього росту двох колоній, мікродифракційна картина другої ділянки (рис. 5 г) знаходиться на границі стику бейнітних колоній.

Розрахунок отриманих дифракційних картин показав, що площа габітусу кристала

1 (011), а кристала 2 – (-112). Відповідно, границя між двома колоніями відповідає спеціальній орієнтації $\Sigma = 7$ в концепції решіток співпадаючих вузлів (див. наприклад роботу [9]).

При температурі 500 °С та витримці у 20 хвилин в структурі спостерігається структура голчастого фериту (рис. 6 а). Ця структурна складова складається з паралельних рейок бейнітного фериту об'єднаних в пакети.

Для з'ясування морфологічного типу фази, яка опинилася між рейками бейнітного фериту в колонії було виконано комплекс досліджень, який містив отримання темнопольного зображення в заданому рефлексі мікродифракційної картини (рис. 6 б). Як показав розрахунок, на мікродифракційній картині присутні рефлекси від двох фаз: об'ємноцентрованої кубічної (бейнітний ферит) та гранецентрованої кубічної (залишковий аустенит). Відповідно, темнопольне зображення було отримано в рефлексі (011) фериту (ОЦК структура, рис. 6. в) та (-200) аустеніту (ГЦК структура, рис. 6 г).

При температурі 450 °С та витримці у 20 хвилин, одночасно з бейнітом, в структурі спостерігається рейковий дислокаційний мартенсит (рис. 7 а).

Проведений мікродифракційний аналіз виявив наявність двох систем рефлексів (рис. 7 б), які відповідають двом типам кристалографічних структур заліза, що підтверджують данні подальшого аналізу структури з застосуванням методу темного поля (рис. 7 в, г).

Як показав проведений комплекс досліджень, термічна обробка по запропонованим режимам (див. рис. 3) призводить до формування у структурі кількох фаз: пересичена вуглецем α - фаза яка з'явилась зсувним шляхом; залишковий аустеніт, який утворився внаслідок стабілізації γ -фази; карбонітриди які утворилися або безпосередньо з γ -фази, або в результаті відпуску α - фази.

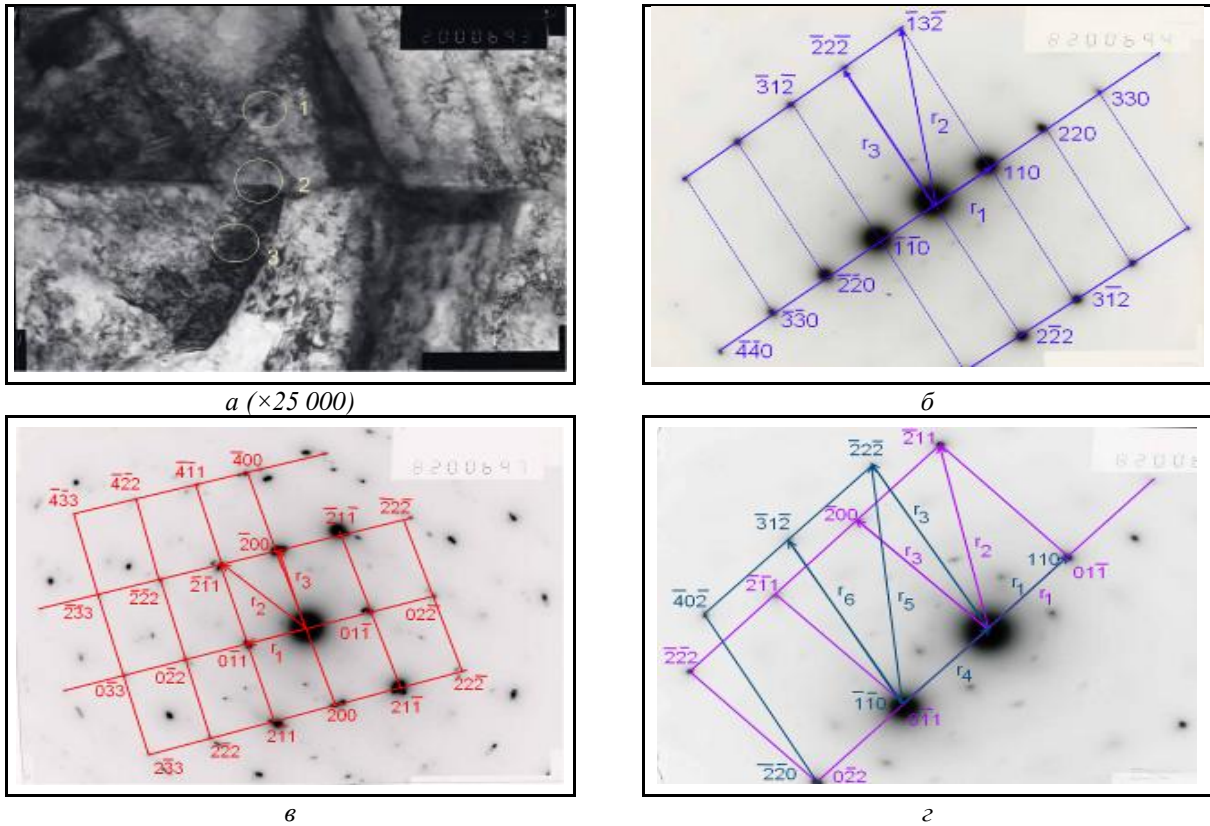


Рис. 5. Мікроструктура сталі 10Г2ФБ після витримки 20 хвилин при температурі 550 °С:
 а – тонка структура колоній верхнього бейніту; б – мікродифракційна картина ділянки 1;
 в – мікродифракційна картина ділянки 3; г – мікродифракційна картина ділянки 2

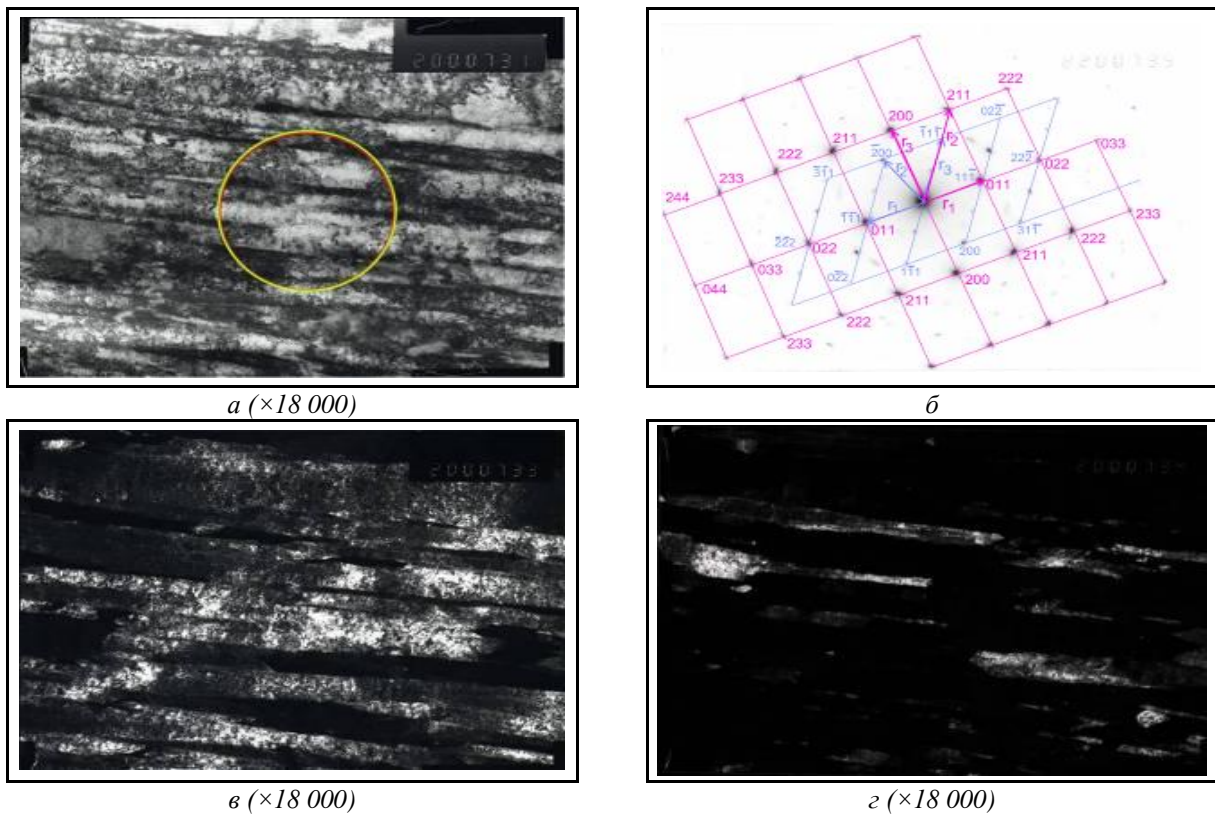
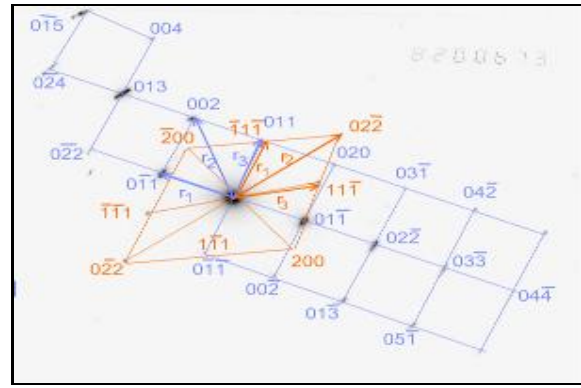


Рис. 6. Мікроструктура сталі 10Г2ФБ після витримки 20 хвилин при температурі 500 °С:
 а – тонка структура пакетів голчастого фериту; б – мікродифракційна картина від позначеної ділянки;
 в – темнопольне зображення в рефлексі (011) фериту; г – темнопольне зображення в рефлексі (-200) аустеніту



а ($\times 18\ 000$)



б



в ($\times 18\ 000$)



г ($\times 18\ 000$)

Рис. 7. Мікроструктура сталі 10Г2ФБ після витримки 20 хвилин при температурі 400 °С: а – тонка структура пакетів голчастого ферит рейкового дислокаційного мартенситу; б – мікродифракційна картина від пакету; в – темнопольне зображення в рефлексії (011) фериту; г – темнопольне зображення в рефлексії (0-20) аустеніту

При цьому, слід зазначити, що структурний стан, який формується при термічній обробці зразків при 550 °С (верхній бейніт) характеризується майже повною відсутністю залишкового аустеніту.

З іншого боку, відомо (див. наприклад роботу [11]), що поява залишкового аустеніту притаманна саме зсувному механізму формування структури, оскільки основною причиною стабілізації аустеніту є виникнення певного рівня внутрішніх напружень. Під час зсувного механізму перетворення аустеніту відбувається упорядкована стрибкоподібна перебудова кристалічної решітки з гранецентрованої в об'ємноцентровану решітку α -фази. При цьому переміщення сусідніх атомів не перевищують міжатомних відстаней, перетворення відбувається бездифузійним шляхом за рахунок тільки зсувів решітки.

Формування колонії відбувається шляхом зсуву на протилежних гранях

площин, де було розпочато перетворення (рис. 8). Сформована рейка мартенситу зміщується за допомогою зсуву частково над и частково під поверхню аустеніту. Як наслідок, горизонтальна поверхня за допомогою зсуву вихідної фази повертається або нахилиється у новому напрямі.

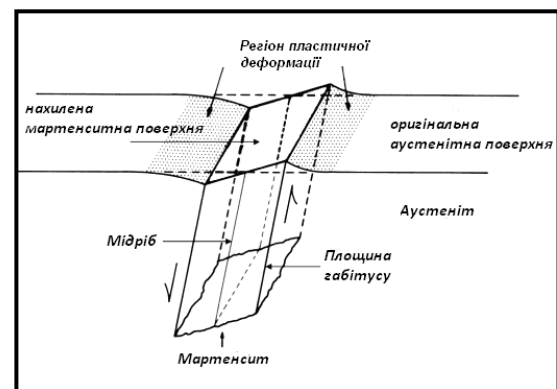


Рис. 8. Схема зсуву та поверхневого нахилу пов'язаного з утворення мартенситної пластини [11]

За рахунок різниці питомих об'ємів аустеніту та мартенситу відбувається збільшення рівня пружних напружень на ділянці когерентного спряження, що в кінцевому рахунку призводить до пластичної деформації аустеніту і забезпечує підвищення ступеня дислокацій в кінцевій структурі [12] і, як наслідок, збільшує опір зсуву.

Отриманні данні досліджень тонкої структури голчастого фериту та рейкового дислокаційного мартенситу частково підтверджують зазначений механізм (див. рис. 6, 7). З іншого боку, різниця в геометричних розмірах колоній між цими двома структурами може свідчити про деякі відмінності у параметрах протікання перебудови кристалічної решітки. У випадку формування структури голчастого фериту (температура витримки 500 °С) між рейками бейнітного фериту спостерігаються лише прошарки залишкового аустеніту. Цей факт може свідчити про те, що при цій температурі атоми вуглецю та азоту, за рахунок дифузії, встигають опинитися на фронті зростаючого кристалу голчастого фериту додатково стабілізуючи γ -фазу. На відміну від голчастого фериту, між рейками в колонії дислокаційного мартенситу (температура витримки 450 °С) окрім залишкового аустеніту також спостерігається карбонитридна фаза.

Аналогічно голчастому фериту та рейковому дислокаційному мартенситу структура верхнього бейніту формується також за зсувним механізмом, про що свідчить форма рейок бейнітного фериту. Але в цьому випадку перетворення відбувається в умовах порівняно високої рухливості атомів, тобто фронт кристалу, який зростає, ще має можливість частково прийняти термодинамічно найбільш вигідну форму. Таким чином, реакцію утворення верхнього бейніту можна розглядати як зсувне $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення, що протікає при порівняно (з температурами 500 та 450 °С) збільшеній дифузійній рухливості атомів домішок за умови певного розвитку релаксаційних процесів в аустенітній фазі.

Саме такі обмеження зсувного механізму забезпечують майже повну відсутність стабілізації γ -фази під час зсувного перетворення і, як наслідок, появи між рейками бейнітного фериту в колонії верхнього бейніту лише карбонитридної фази без прошарків залишкового аустеніту.

Висновки

1. Проведено дослідження морфології структурних складових, які формуються в низьковуглецевих низьколегованих сталях внаслідок дії проміжного та зсувного механізмів перетворення переохолодженого аустеніту.

2. Проведений комплекс досліджень показав, що термічна обробка в температурному інтервалі 550...450 °С з витримкою 20 хвилин призводить до формування в структурі низьковуглецевих низьколегованих сталей бейніту різної морфологічної форми (верхній бейніт та голчастий ферит) та рейкового дислокаційного мартенситу (спостерігається при температурі витримки 450 °С).

3. Мікродифракційний аналіз верхнього бейніту показав, що границя між двома колоніями має структуру, яка відповідає границям спеціального (низько-енергетичного) типу ($\Sigma = 7$ в концепції решіток співпадаючих вузлів).

4. Сумісний аналіз даних мікродифракційних та темнопольних досліджень показав, що в пакетах голчастого фериту (температура витримки 500 °С) між рейками фериту знаходиться лише залишковий аустеніт. Разом з цим, в колоніях рейкового дислокаційного мартенситу між рейками одночасно з залишковим аустенітом присутня також карбонитридна фаза.

5. Проведений комплекс досліджень показав, що відмінності в морфології структурних складових, які формуються під час витримки в температурному інтервалі 550...450 °С обумовлені, в першу чергу, різницею в швидкостях і, як наслідок, обмеженнях протікання процесів зсуву кристалічної решітки. Чим вище температура перетворення, тим більша

дифузійна активність атомів, тим менша α -Fe.
швидкість зсувного перетворення γ -Fe в

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. DeArdo A. J. Modern Thermomechanical Processing of Microalloyed Steel. *Microalloying '95 : Proceedings of the International Conference*. Pittsburgh, 1995. Pp. 15–35. URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1290575>
2. Beketov O., Laukhin D., Rott N., Schudro A. The Elaboration of Modernized Technology of Controlled Rolling Directed at the Formation of High Strengthening and Viscous Qualities in HSLA Steel. *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 291. Pp. 13–19. URL: <https://www.scientific.net/SSP.291.13>
3. Roberts W., Sandberg A., Siwecki T., Werlefors T. Steels Technology and Applications. ASM, Metals Park. Ohio, 1984. Pp. 67–84. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02662583>
4. Gladman T., Dulieu D., McIvor I. D. Structure – property relationships in high strength microalloyed steels. *Micro – Alloying 75 : International Conference*. Washington, 1975. Pp. 32–58. URL: https://www.researchgate.net/publication/306134928_Evolution_of_Microalloyed_Steels_Since_Microalloying_'75_with_Specific_Emphasis_on_Li_nepipe_and_Plate
5. Tamura L., Ouchi C., Tanaka T., Seikine H. Thermomechanical Processing of High Strength Low Alloy Steels. Bodmin: Robert Hartnoll Ltd., 1988. 248 p. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://dl.iran-mavad.com/pdf95/Thermomechanical%20Processing%20of%20HSLA_iran-mavad.com.pdf
6. Krauss G. Steels. Processing, Structure and Performance. ASM International. 2006. 593 p. URL: https://books.google.com.ua/books/about/Steels.html?id=59yWLw0HlzMC&redir_esc=y
7. Бекетов О. В. Особливості процесів структуроутворення і розробка параметрів зміцнення сталі 10Г2ФБ: автореферат дис. канд. техн. наук.: 05.02.01. Дніпропетровськ, 2004. 22 с. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://ukrbook.net/litopys/avtoreferat/2005/La_1_05.pdf
8. Buseck P. R., Lijima S. High resolution electron microscopy of enstatite. *Amer. Mineral*. 1975. Vol. 60. Pp. 758–780. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj>; https://ruff.geo.arizona.edu/doclib/am/vol60/AM60_758.pdf
9. Manua R., Ciupina V., Prodan G. Comparative analysis of electron diffraction pattern obtained without and with precession system. *Journal of Ovonic Research*. 2020. Vol. 16. Pp. 189–196. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj>; https://www.chalcogen.ro/189_ManuaR.pdf
10. Cowley J. M. Crystal structure determination by electron diffraction. *Progr. Mater. Sci.* 1967. Vol. 13. Pp. 267–321. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0079642568900236>
11. Ohtani H., Okaguchi S., Fujitiro Y., Ohmori Y. Morphology and propitious of Low-carbon bainite. *Metallurgical transactions*. 1990. Vol. 21A. Pp. 877–888. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1990MTA....21..877O/abstract>
12. DeArdo A. J., Ratz G. A., Wray P. J. Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite. *Metallurgical Society of AIME*. 1982. 682 p. URL: https://books.google.com.ua/books/about/Thermomechanical_Processing_of_Microallo.html?id=DesDAQAIAAJ&redir_esc=y

REFERENCES

1. DeArdo A.J. Modern Thermomechanical Processing of Microalloyed Steel. *Microalloying '95 : Proceedings of the International Conference*. Pittsburgh, 1995, pp. 15–35. URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1290575>
2. Beketov O., Laukhin D., Rott N. and Schudro A. The Elaboration of Modernized Technology of Controlled Rolling Directed at the Formation of High Strengthening and Viscous Qualities in HSLA Steel. *Solid State Phenomena*. 2019, vol. 291, pp. 13–19. URL: <https://www.scientific.net/SSP.291.13>
3. Roberts W., Sandberg A., Siwecki T. and Werlefors T. Steels Technology and Applications. ASM, Metals Park. Ohio, 1984, pp. 67–84. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02662583>
4. Gladman T., Dulieu D. and McIvor I.D. Structure – property relationships in high strength microalloyed steels. *Micro – Alloying 75 : International Conference*. Washington, 1975, pp. 32–58. URL: https://www.researchgate.net/publication/306134928_Evolution_of_Microalloyed_Steels_Since_Microalloying_'75_with_Specific_Emphasis_on_Li_nepipe_and_Plate
5. Tamura L., Ouchi C., Tanaka T. and Seikine H. Thermomechanical Processing of High Strength Low Alloy Steels. Bodmin : Robert Hartnoll Ltd., 1988, 248 p. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://dl.iran-mavad.com/pdf95/Thermomechanical%20Processing%20of%20HSLA_iran-mavad.com.pdf
6. Krauss G. Steels. Processing, Structure and Performance. ASM International. 2006, 593 p. URL: https://books.google.com.ua/books/about/Steels.html?id=59yWLw0HlzMC&redir_esc=y

7. Beketov O.V. *Osoblyvosti protsesiv strukturoutvorennia i rozrobka parametriv zmitsnennia stali 10H2FB : avtoreferat dys. kand. tekhn. nauk.: 05.02.01* [Peculiarities of the processes of structure formation and the development of strengthening parameters of steel 10G2FB]. Dnipropetrovsk, 2004, 22 p. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://ukrbook.net/litopys/avtoreferat/2005/La_1_05.pdf (in Ukrainian).
8. Buseck P.R. and Lijima S. High resolution electron microscopy of enstatite. *Amer. Mineral.* 1975, vol. 60, pp. 758–780. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://ruff.geo.arizona.edu/doclib/am/vol60/AM60_758.pdf
9. Manua R., Ciupina V. and Prodan G. Comparative analysis of electron diffraction pattern obtained without and with precession system. *Journal of Ovonic Research.* 2020, vol. 16, pp. 189–196. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.chalcogen.ro/189_ManuR.pdf
10. Cowley J.M. Crystal structure determination by electron diffraction. *Progr. Mater. Sci.* 1967, vol. 13, pp. 267–321. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0079642568900236>
11. Ohtani H., Okaguchi S., Fujitiro Y. and Ohmori Y. Morphology and propitious of Low-carbon bainite. *Metallurgical Transactions.* 1990, vol. 21A, pp. 877–888. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1990MTA....21..877O/abstract>
12. DeArdo A.J., Ratz G.A. and Wray P.J. Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite. *Metallurgical Society of AIME.* 1982, 682 p. URL: https://books.google.com.ua/books/about/Thermomechanical Processing of Microallo.html?id=DesDAQAIAAJ&redir_esc=y

Надійшла до редакції: 20.11.2024.

УДК 620.181.4:691.714

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.17.1124

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРИСКОРЕННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА КІНЕТИКУ РУЙНУВАННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

БЕКЕТОВ О. В.,^{1*}, докт. техн. наук, доц.,
ЛАУХІН Д. В.², докт. техн. наук, проф.,
ОСИПЧУК М. М.³, канд. ф.-м. наук, доц.,
ПОМАЗАН А. Р.⁴, маг.
РАДЬКО О. В.⁵, асп.

^{1*} Кафедра фундаментальних і природничих дисциплін, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 604-61-86, e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

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

³ Кафедра фундаментальних і природничих дисциплін, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 831-65-76, e-mail: osypchuk.mykola@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1524-5479

⁴ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: radko0708@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-2281-6953

⁵ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: radko0708@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-6928-6090

Анотація. Розвиток сучасного будівництва ставить все зростаючі вимоги до властивостей матеріалів: підвищення їх механічних і корозійних характеристик. Особливе місце в широкому колі питань, пов'язаних з проблемою експлуатаційної надійності зварювальних металевих конструкцій, посідає вивчення здатності матеріалів чинити опір руйнуванню при статичних і динамічних навантаженнях. При цьому, опір матеріалу поширенню в ньому тріщини визначається його структурою, а саме морфологічними особливостями тонкої будови: розміром структурних складових, дисперсністю і розподілом неметалевих включень, типом внутрішньофазних та міжфазних границь. Саме тому, велике значення має дослідження взаємозв'язку між морфологічними особливостями структурних складових і характеристики руйнування. С цієї точки зору, однією з найбільш цікавих структурних складових є бейніт, тому що сталі з бейнітною структурою володіють високою міцністю при задовільній пластичності. Саме тому, вдосконалення властивостей високоміцного прокату з низьковуглецевих сталей для зварних будівельних металевих конструкцій шляхом з'ясування принципів залежностей між механізмами формування тонкої структури зазначених сталей та кінетикою розповсюдження руйнування є актуальною проблемою як з науковою так і з економічної точок зору. **Мета статті** – визначення взаємозв'язку між режимами післядеформаційного охолодження, кінцевою структурою та морфологією поверхонь руйнування металопрокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей. **Висновок.** Проведено комплекс досліджень взаємозв'язку між структурним станом та морфологією поверхонь руйнування низьковуглецевих низьколегованих сталей. Встановлено, що збільшення швидкості охолодження призводить до зростання відсоткового вмісту продуктів бейнітного та мартенситного механізмів перетворення переохолодженого аустеніту. При цьому показано, що одночасно з відсотковою кількістю зростає також і геометричний розмір відповідних колоній. Шляхом використання макрофрактографічного аналізу показано, що руйнування усіх зразків відбувається переважно по крихкому механізму. При цьому, результати мікрофрактографічного аналізу показали наявність певної кореляції між геометричними розмірами колоній бейніту та/або мартенситу та розмірами ділянок квазікрихкого руйнування. Наявність такої кореляції може свідчити про те, що в процесі руйнування пластична деформація локалізується в ділянках, які мають підвищений рівень внутрішньої енергії, зокрема всередині колоній бейніту та/або мартенситу.

Ключові слова: структурний стан; контрольована прокатка; низьковуглецева низьколегована сталь; прискорене охолодження; бейнітна складова; мартенситна складова; поверхня руйнування; квазікрихке руйнування

STUDY OF THE INFLUENCE OF ACCELERATED COOLING ON THE KINETICS OF DESTRUCTION OF LOW-CARBON LOW-ALLOY STEELS

BEKETOV O.V.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
LAUKHIN D.V.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
OSYPCHUK M.M.³, *Cand. Sc. (Phys. And Math.), Assoc. Prof.*,
POMAZAN A.R.⁴, *Master's degree*,
RADKO O.V.⁵, *PhD Stud.*

^{1*} Department of Fundamental and Natural Sciences, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 604-61-86, e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

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

³ Department of Fundamental and Natural Sciences, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 831-65-76, e-mail: osypchuk.mykola@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1524-5479

⁴ Department of Materials Science and Processing, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 650-90-22, ORCID ID: 0009-0004-2281-6953

⁵ Department of Materials Science and Processing, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 650-90-22, e-mail: radko0708@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-6928-6090

Abstract. The development of modern construction places ever-increasing demands on the properties of materials: improving their mechanical and corrosion characteristics. A special place in the wide range of issues related to the problem of operational reliability of welded metal structures is occupied by the study of the ability of materials to resist destruction under static and dynamic loads. At the same time, the material's resistance to crack propagation in it is determined by its structure, namely the morphological features of the fine structure: the size of the structural components, the dispersion and distribution of non-metallic inclusions, the type of intraphase and interphase boundaries. That is why the study of the relationship between the morphological features of the structural components and the characteristics of destruction is of great importance. From this point of view, one of the most interesting structural components is bainite, because steels with a bainite structure have high strength with satisfactory plasticity. That is why the improvement of the properties of high-strength rolled products from low-carbon steels for welded building metal structures by elucidating the fundamental relationships between the mechanisms of the formation of the fine structure of the specified steels and the kinetics of fracture propagation is an urgent problem from both a scientific and an economic point of view. **Purpose of the article.** determining the relationship between post-deformation cooling regimes, the final structure and morphology of fracture surfaces of rolled metal from low-carbon, low-alloy steels. **Conclusion.** A set of studies on the relationship between the structural state and the morphology of the fracture surfaces of low-carbon, low-alloy steels has been conducted. It was established that an increase in the cooling rate leads to an increase in the percentage content of the products of bainite and martensitic mechanisms of transformation of undercooled austenite. At the same time, it is shown that the geometric size of the corresponding colonies also increases simultaneously with the percentage number. By using macrofractographic analysis, it is shown that the destruction of all samples occurs mainly by a brittle mechanism. At the same time, the results of the microfractographic analysis showed the presence of a certain correlation between the geometric sizes of the bainite and/or martensite colonies and the sizes of the areas of quasi-brittle fracture. The presence of such a correlation may indicate that in the process of destruction, plastic deformation is localized in areas that have an increased level of internal energy, in particular within the colonies of bainite and/or martensite.

Keywords: *structural condition; low-carbon low-alloy steel; accelerated cooling; bainite component; martensitic component; failure surface; quasi-brittle fracture*

Постановка проблеми. Розвиток сучасного будівництва ставить все зростаючі вимоги до властивостей матеріалів: підвищення їх механічних і корозійних характеристик [1]. Водночас з розробкою нових сплавів йде вдосконалення

та поліпшення якості вже існуючих. Подальше просування в цьому напрямку неможливе без розширення та поглиблення знань та уявлень про процеси, які відбуваються в металі внаслідок його

взаємодії з зовнішнім середовищем під час експлуатації.

Особливе місце в широкому колі питань, пов'язаних з цією проблемою, посідає вивчення здатності матеріалів чинити опір руйнуванню при статичних і динамічних навантаженнях. При цьому опір матеріалу поширенню в ньому тріщини визначається його структурою, а саме морфологічними особливостями тонкої будови: розміром структурних складових, дисперсністю і розподілом неметалевих включень, типом внутрішньофазних та міжфазних границь [2].

Саме тому, вдосконалення властивостей високоміцного прокату з низьковуглецевих сталей для зварних будівельних металевих конструкцій шляхом з'ясування принципів залежностей між механізмами формування тонкої структури зазначених сталей та кінетикою розповсюдження руйнування є актуальною проблемою як з науковою так і з економічної точок зору.

Аналіз публікацій. У сучасному будівництві, при ускладненні та посиленні умов експлуатації відповідальних конструкцій, надзвичайно актуальною стала проблема створення матеріалів і видів їх обробки, що забезпечують, поряд з високою міцністю, достатню тріщиностійкість [3]. На теперішній час, в залежності від умов експлуатації готової конструкції, металопрокат може поставлятися у

різноманітному структурному стані: відпущений мартенсит; з ферито-перлітною, ферито-бейнітною або ферито-мартенситною структурою [3]. При цьому, однією з найбільш цікавих структурних складових є бейніт, тому що сталі з бейнітною структурою володіють високою міцністю при задовільній пластичності [4].

З цієї точки зору, велике значення має дослідження взаємозв'язку між морфологічними особливостями структурних складових і характеристики руйнування. Серед фізичних методів вивчення зв'язку складу і структури матеріалу з комплексом його експлуатаційних властивостей особливе місце відводиться дослідженню поверхонь руйнування (зламів) [5], оскільки злам найбільш чітко відображає будову матеріалу в локальному обсязі, в якому протікає процес руйнування [6].

Мета статті – визначення взаємозв'язку між режимами післядеформаційного охолодження, кінцевою структурою та морфологією поверхонь руйнування металопрокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей.

Результати досліджень. У якості матеріалу для дослідження було обрано низьковуглецеву низьколеговану сталь 10Г2ФБ, хімічний склад якої наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі 10Г2ФБ

Товщина, мм	Елемент, %									
	C	Mn	Si	S	Cr	Ti	Mo	V	Nb	Fe
20	0,16	1,28	0,24	0,004	0,02	0,015	0,001	0,061	0,038	зал

На підставі результатів, які отримано в роботі [7] було обрано набір швидкостей охолодження для отримання в структурі сталі різної відсоткової кількості продуктів проміжного та зсувного механізмів перетворення аустеніту. Відповідно, з метою отримання заданого структурного стану зразки сталі піддавали термічній обробці з окремого нагріву згідно схеми, наведеної на рисунку 1.

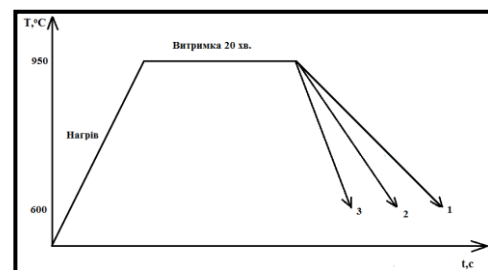


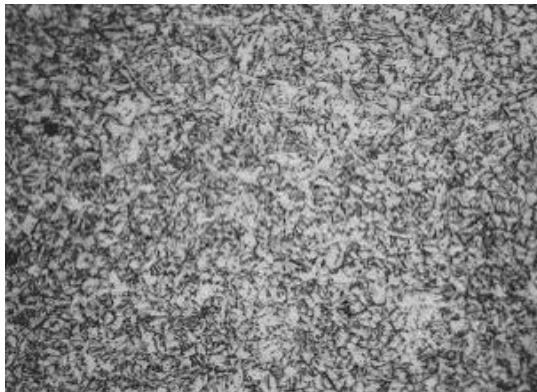
Рис. 1. Схема термічної обробки з окремого нагріву зразків сталі 10Г2ФБ: 1 – технічне масло ($V_{охол} \approx 12 \text{ }^\circ\text{C/c}$); 2 – холодна вода ($V_{охол} \approx 26 \text{ }^\circ\text{C/c}$); 3 – 10 % розчин NaCl у воді ($V_{охол} \approx 34 \text{ }^\circ\text{C/c}$)

Дослідження структурного стану, фрактографічний аналіз поверхонь зламів і кількісний аналіз отриманих даних здійснювали з застосуванням растрового електронного мікроскопу РЕМ-106І згідно рекомендацій наведених у роботі [8].

Результати відповідних мікро-структурних досліджень представлено на рисунку 2. Аналіз наведених даних свідчить про те, що при охолодженні зі швидкістю

12 °С/с формується 30 % феритної фази. Залишковий аустеніт розпадається на бейніт (65 %) та мартенсит (5 %) (рис. 2 а, б).

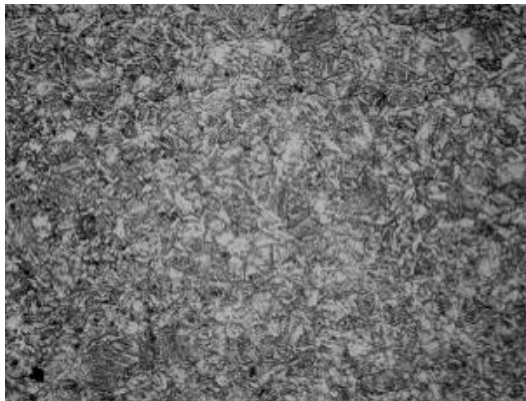
Подальше збільшення швидкості охолодження (гартування у холодну воду) призводить до зменшення кількості феритної фази, її вміст становить вже не більше 15 %. Одночасно спостерігається збільшення кількості мартенситу до 15 % та бейніту ~70 % (рис. 2 в, з).



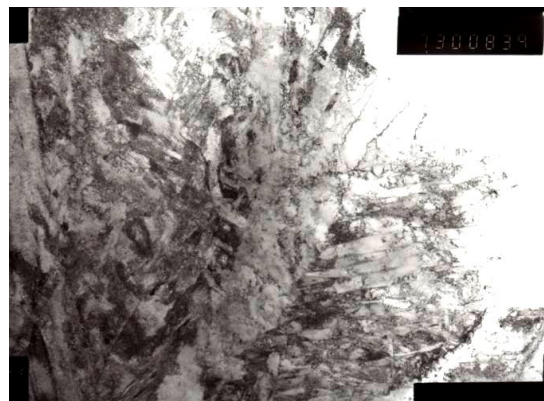
а (×500)



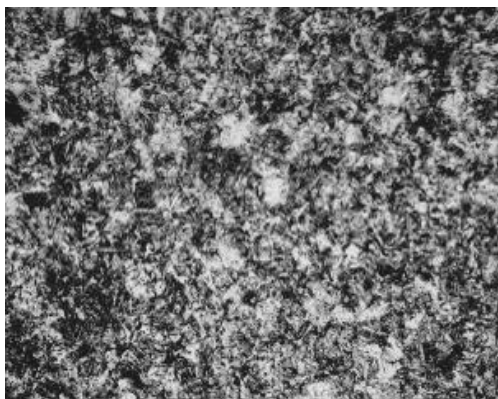
б (×22 000)



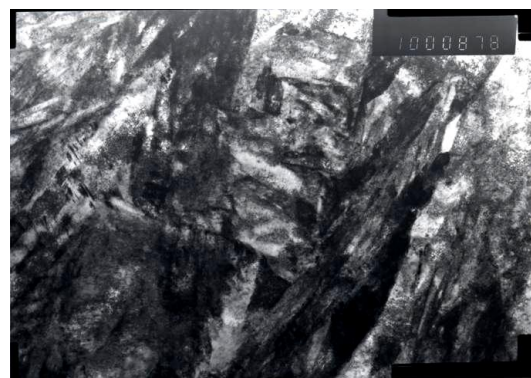
в (×500)



з (×15 000)



д (×500)



е (×20 000)

Рис. 2. Мікроструктура сталі 10Г2ФБ після охолодження зі швидкостями:
а, б – 12 °С/с; в, з – 26 °С/с; д, е – 34 °С/с

Охолодження зі швидкістю 34 °С/с призводить до формування по границям колишнього аустеніту дрібнодисперсного фериту. При цьому, структура являє собою бейнітно-мартенситний конгломерат з невеликою кількістю доєвтектоїдного фериту, який розташовується навколо бейнітної складової. Бейнітні колонії мають ярко виражену рейкову морфологію (рис. 2 *д, е*). Вміст фериту складає не більше 10 %, вміст бейніту та мартенситу становить 60 % та 30 % відповідно.

Результати підрахунків геометричних розмірів структурних складових, які формуються за зсувним механізмом перетворення представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Геометричні розміри колоній бейнітну та мартенситу

Швидкість охолодження	12 °С/с	26 °С/с	34 °С/с
Середній розмір колоній	24 мкм	30,5 мкм	34,2 мкм

Аналіз наведених даних показує, що збільшення швидкості охолодження призводить до зростання геометричних розмірів колоній бейніту та мартенситу. Це пояснюється тим, що збільшення швидкості охолодження призводить до зниження швидкості дифузійних процесів, які відбуваються під час перетворення переохолодженого аустеніту. Як наслідок, майже не відбувається формування бар'єрів на фронті зростаючої колонії, що дає можливість колонії збільшувати власні розміри.

Для оцінки взаємозв'язку між структурним станом та морфологією поверхонь руйнування було виконано комплекс фрактографічних досліджень. Оцінку кількості в'язкої та крихкої складової у зламах здійснювали шляхом застосування макрофрактографічного аналізу.

Проведений комплекс досліджень показав, що в зразку охолодженому у технічному маслі, зі швидкістю ~ 12 °С/с, руйнування проходить переважно по крихкому механізму, кількість в'язкої

складової ~27 %. У зламі зразка, який було охолоджено у холодну воду ($V_{\text{охол}} \approx 26$ °С/с) кількість в'язкої складової зменшилася до 20 %. Охолодження у 10 % розчині NaCl ($V_{\text{охол}} \approx 34$ °С/с) призводить до появи не більше ніж 8 % в'язкого зламу.

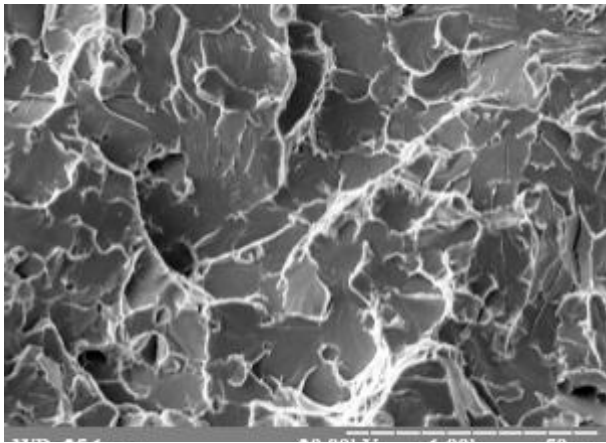
Дані мікрофрактографічного аналізу наведено на рисунку 3.

Охолодження зі швидкістю 12 °С/с (рис. 3 *а, б*) сприяло формуванню структури бейніту та фериту (65 % та 30 % відповідно), залишок це мартенсит – 5 %. При такому структурному стані руйнування проходить з наявністю в'язкої та крихкої фаз у співвідношенні 73 % на 27 %. При цьому, ступінь пластичної деформації перед злиттям порожнин залежить головним чином від відстані між сусідніми порожнинами, що у свою чергу часто визначається щільністю розподілу часток, що випали. Разом з цим, у зразку спостерігається наявність внутрізеренного руйнування, присутній також квазікрихкий злам.

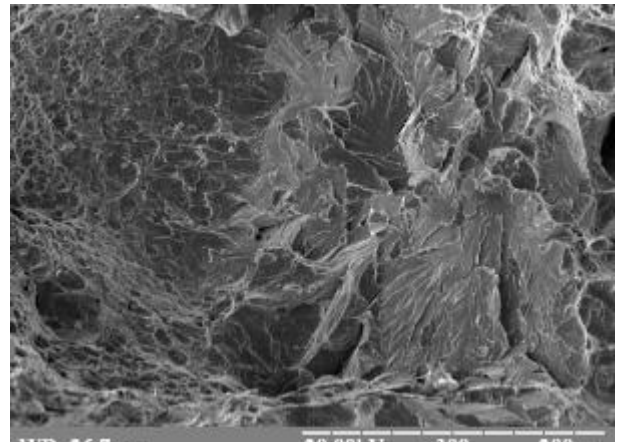
Квазівідрив на початковій стадії утворення фасетки виявляє ознаки переважно кристалітного відриву, тоді як у місцях злиття мікротріщин виявляються ознаки пластичного руйнування.

Фактографічний аналіз зламу зразка, що охолоджувався у холодній воді, зі швидкістю ~ 26 °С/с, показує що крихкий злам збільшується, порівняно зі зразком охолодженим у масло, і становить вже близько 80 %. Цьому сприяє зменшення вмісту феритної фази на користь бейнітно - мартенситної складової, яка складає відповідно 70 % та 15 %. Такий структурний стан сприяє збільшенню твердості, а відповідно і крихкості матеріалу.

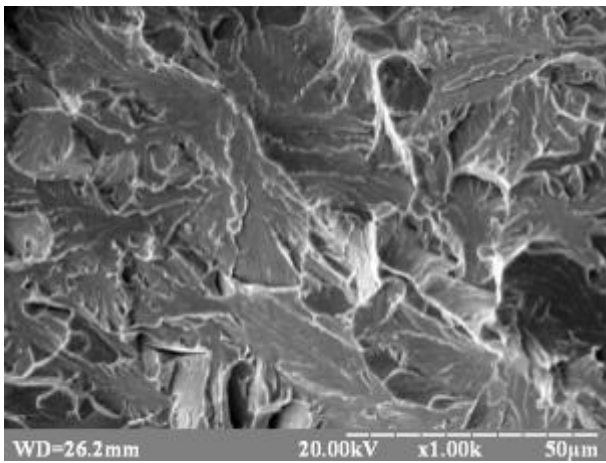
Завдяки мартенситу ступінь пластичної деформації теж зменшується. Мікрофрактографічний аналіз показав, що руйнування відбувалося за рахунок злиття мікропорожнин (на поверхні зламу наявні елементи, які свідчать, що руйнування відбулося шляхом злиття мікропорожнин), так і за рахунок внутрізереного руйнування вірогідно бейнітних та/або мартенситних колоній.



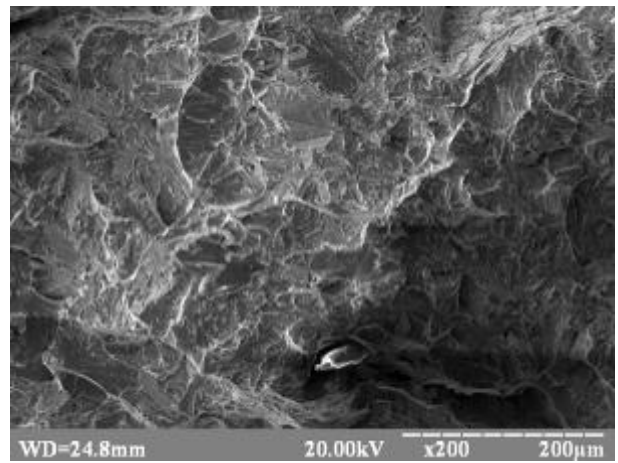
a



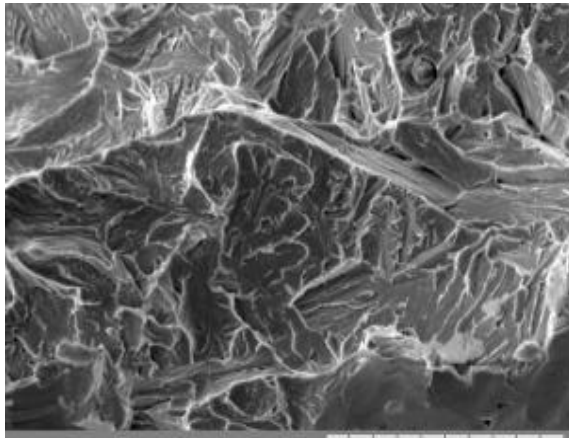
б



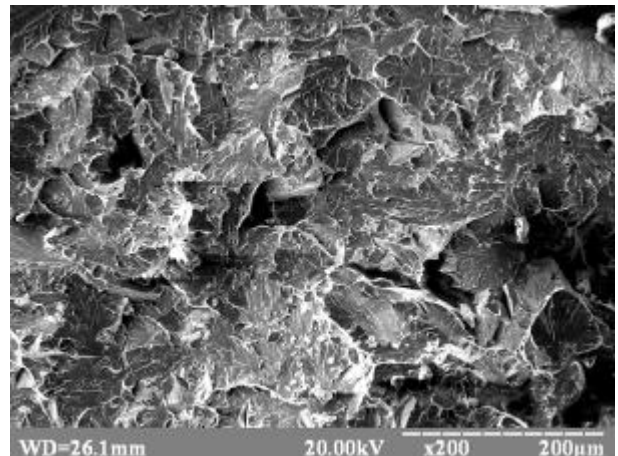
в



г



д



е

*Рис. 3. Структура зламів сталі 10Г2ФБ після охолодження зі швидкостями:
а, б – 12 °С/с; в, г – 26 °С/с; д, е – 34 °С/с*

Після охолодження у солоній воді (10 % NaCl) в зразку зформувалася бейнітно–мартенситна структура (60 % та 30 % відповідно) та феритна складова структури (не перевищує 10 %). Аналіз зламу зразка показує, що крихка складова зламу складає

~ 92 %. В зразку переважає внутризеренне руйнування, яке може проходити при майже повній відсутності пластичної деформації. Зона поширення тріщини представляє типовий квазіотрив з незначними ознаками пластичної деформації.



а



б

Рис. 4. Кількісний аналіз поверхонь руйнування:
 а – залежність відсоткового вмісту крихкої складової зламу від швидкості охолодження;
 б – залежність розмірів ділянок квазікрихкого руйнування від швидкості охолодження

Для виявлення закономірностей між структурним станом сталі та механізмом руйнування було проведено кількісний аналіз відсоткового вмісту крихкої складової зламу та розмірів ділянок квазікрихкого руйнування в залежності від швидкості охолодження. Відповідні дані узагальнено та наведено на рисунку 4.

Висновки

1. Проведений комплекс досліджень дозволив проаналізувати взаємозв'язок між структурним станом та морфологією поверхонь руйнування низьковуглецевих низьколегованих сталей.

2. Встановлено, що збільшення швидкості охолодження призводить до зростання відсоткового вмісту продуктів бейнітного та мартенситного механізмів перетворення переохолодженого аустеніту. При цьому показано, що одночасно з відсотковою кількістю зростає також і геометричний розмір відповідних колоній. Це обумовлено тим, що при охолодженні з великою швидкістю подавляється ріст феритних зерен і збільшується інші структурні складові.

3. Макрофрактографічний аналіз показує, що руйнування усіх зразків відбувається переважно по крихкому механізму. При цьому, результати мікрофрактографічного аналізу показали наявність певної кореляції між геометричними розмірами колоній бейніту та/або мартенситу та розмірами ділянок квазікрихкого руйнування.

4. При збільшенні швидкостей охолодження зразків, а значить і розміру колоній бейніту та або мартенситу пропорційно зменшується і відстань між зонами квазікрихкого руйнування. Цей факт дозволяє припустити, що пластична деформація локалізується в областях з більш високим ступенем енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Паламарчук О., Петришина С. Будівельна галузь України: стан та прогнози. *Економіка та суспільство*. 2023. № 51. С. 125–131. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/2497>
2. Бекетов О. В., Большаков В. І., Лаухін Д. В., Іванцов С. В., Лаухін В. Д. Дослідження взаємозв'язку між характеристиками руйнування та структурними складовими низьковуглецевих мікролегованих сталей. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2016. № 1 (72). С. 53–58. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/53-58>
3. ДСТУ 8539:2015 Прокат для будівельних сталевих конструкцій. Загальні технічні умови. [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2015. 23 с. (Інформація та документація). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=64876
4. De Cooman B. Structure-properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2004. Vol. 8. Pp. 285–303. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359028604000804>
5. Caballero F. G., Miller M. K., Garcia-Mateo C. Tracking solute atoms during bainite reaction in a nanocrystalline steel. *Materials Science and Technology*. 2010. Vol. 26. Pp. 889–898. URL:

<https://www.researchgate.net/publication/216224719> Tracking solute atoms during bainite reaction in a nanocrystalline steel

6. Laukhin D. V., Beketov O. V., Rott N. O., Tyuterev I. A., Ivantsov S. V., Laukhin V. D. The Analysis of Interrelation between Kinetics of Propagation of Plastic Deformation and Initiation of Ductile Fracture. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2017. Vol. 39, № 10. Pp. 1335–1343. URL: <https://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v39/i10/1335.html>

7. Бекетов О. В., Іванцов С. В., Тютєрев І. А., Ротт Н. О., Бабенко Є. О. Дослідження загальних особливостей розповсюдження пластичної деформації в сталях з феррито-перлітною структурою. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування.* 2017. Вип. 95. С. 26–34. URL: <http://smm.pgasa.dp.ua/article/view/100189>

8. Stokes D. J. Principles and Practice of Variable Pressure/Environmental Scanning Electron Microscopy. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008. 221 p. URL : <https://www.researchgate.net/publication/285935810> Principles and Practice of Variable Pressure Environmental Scanning Electron Microscopy VP-ESEM

REFERENCES

1. Palamarchuk O. and Petryshyna S. *Budivelna haluz Ukrainy : stan ta prohnozy* [The construction industry of Ukraine : state and forecasts]. *Ekonomika ta suspilstvo* [Economy and Society]. 2023, no. 51, pp. 125–131. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/2497> (in Ukrainian).

2. Beketov O.V., Bolshakov V.I., Laukhin D.V., Ivantsov S.V. and Laukhin V.D. *Doslidzhennia vziaimozv'iazku mizh kharakterystykamy ruynuvannia ta strukturnymy skladovymy nyzkovuhletsevykh mikrolehovanykh stalei* [Research on the relationship between fracture characteristics and structural components of low-carbon microalloyed steels]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Science Metal and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 1 (72), pp. 53–58. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/53-58> (in Ukrainian).

3. *DSTU 8539:2015. Prokat dlia budivelnykh stalevykh konstruktii. Zahalni tekhnichni umovy* [Rolls for building steel structures. General technical conditions]. [Chynnyi vid 2016-07-01]. Kyiv, 2015, 23 p. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=64876 (in Ukrainian).

4. De Cooman B. Structure–properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science.* 2004, vol. 8, pp. 285–303. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359028604000804>

5. Caballero F.G., Miller M.K. and Garcia-Mateo C. Tracking solute atoms during bainite reaction in a nanocrystalline steel. *Materials Science and Technology.* 2010, vol. 26, pp. 889–898. URL: <https://www.researchgate.net/publication/216224719> Tracking solute atoms during bainite reaction in a nanocrystalline steel

6. Laukhin D.V., Beketov O.V., Rott N.O., Tyuterev I.A., Ivantsov S.V. and Laukhin V.D. The Analysis of Interrelation between Kinetics of Propagation of Plastic Deformation and Initiation of Ductile Fracture. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2017, vol. 39, no. 10, pp. 1335–1343. URL: <https://mfint.imp.kiev.ua/ua/abstract/v39/i10/1335.html>

7. Beketov O.V., Ivantsov S.V., Tyuterev I.A., Rott N.O. and Babenko Ye.O. *Doslidzhennia zahalnykh osoblyvostei rozpovsiudzhennia plastychnoi deformatsii v staliakh z ferro-perlitnoiu strukturoiu.* [Study of the general features of the propagation of plastic deformation in steels with a ferro-pearlitic structure]. *Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannia* [Civil Engineering, Material Science, Engineering]. 2017, vol. 95, pp. 26–34. URL: <http://smm.pgasa.dp.ua/article/view/100189> (in Ukrainian).

8. Stokes D.J. Principles and Practice of Variable Pressure/Environmental Scanning Electron Microscopy. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008, 221 p. URL : <https://www.researchgate.net/publication/285935810> Principles and Practice of Variable Pressure Environmental Scanning Electron Microscopy VP-ESEM

Надійшла до редакції: 16.11.2024.

УДК 620.92(075.8)

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.25.1125

ЗАСТОСУВАННЯ НЕТРАДИЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ОБ'ЄКТІВ УКРАЇНИ

БЄЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
КОЛЕСНИК І. О.², *канд. техн. наук, доц.*,
ТИЩЕНКО О. М.³, *докт. техн. наук, проф.*,
СМИРНОВ Є. Д.^{4*}, *асп.*

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

² Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: kolesnik.inna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5852-2392

³ Кафедра геодезії, землеустрою, будівельних конструкцій та безпеки життєдіяльності, Черкаський державний технологічний університет, бульвар Шевченка, 460, 18006, Черкаси, Україна, Тел. (0472) 51-15-56, e-mail: tyshchenkooleksandr56@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7303-6360

^{4*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: smirnov0800@icloud.com, ORCID ID: 0009-0000-1341-1675

Анотація. Актуальність роботи. Згідно статистичних даних та проведеного аналізу визначено, що у зв'язку з воєнним станом в Україні значна кількість об'єктів енергетики знаходиться в критичному стані. Нестача електроенергії в Україні призводить до цілої низки порушень в забезпеченні безпеки життєдіяльності населення. Так починаючи з червня 2022 року введени тимчасові графіки відключення електроенергії. Зростання економічних показників світової економіки призводить до поступового збільшення споживання енергетичних ресурсів. **Мета** - забезпечення електроенергією нетрадиційних джерел енергії для безперебійної роботи технологічних процесів та забезпечення безпеки життєдіяльності населення. **Методика.** При існуючому рівні науково-технічного прогресу теплопостачання та електроспоживання, використання органічних палив (вугілля, нафта, газ), гідроенергії і атомної енергії на основі теплових нейтронів. Однак за результатами численних досліджень органічне паливо в недалекому майбутньому може задовольнити запити світової енергетики тільки частково. Решта електропотреб може бути задоволена за рахунок інших джерел енергії – нетрадиційних і поновлюваних. **Наукові результати.** Для виробництва енергії переважно використовують викопні джерела (біля 87 % усієї енергії). Доля відновлювальної енергетики складає лише 8,6 %. До того ж відновлювальна енергетика активніше розвивається у розвинутих країнах світу внаслідок державних дотацій. За прогнозами аналітиків компанії *British Petroleum* до 2030 року частка енергоносіїв, отриманих з викопних джерел енергії, зменшиться до 82 %, частка відновлювальної енергетики зростає до 12 %, а відносна кількість енергії, отримана від ядерної енергетики, зміниться не значно. Невизначеність науково-практичного обґрунтування пріоритетних напрямків використання відновлювальних джерел енергії для забезпечення потреб об'єктів не дозволяє широке застосування в Україні. **Практичні результати.** Використання відновлювальних джерел енергії найближчі 20 років дасть змогу заощадити викопні енергоресурси, але цілковиту відмову від викопних джерел енергії – справа далекої перспективи. Тому одним з пріоритетних напрямків розвитку енергетики в XXI ст. є всебічне використання відновлювальних джерел енергії, які мають величезні ресурси, що дозволить знизити негативний вплив енергетики на довкілля, підвищити енергетичну і екологічну безпеку.

Ключові слова: нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії; безпеки життєдіяльності; безпеки експлуатації будівель і споруд; забезпечення безпеки; енергоефективність

APPLICATION OF NON-TRADITIONAL ENERGY SOURCES TO ENSURE THE SECURITY OF VITAL ACTIVITIES OF UKRAINE FACILITIES

BIELIKOV A.S.¹, *Dr Sc. (Tech.), Prof.*,
KOLESNYK I.O.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
TYSHCHENKO O.M.³, *Dr Sc. (Tech.), Prof.*,
SMIRNOV Ye.D.^{4*}, *Postgrad. Stud.*

¹ Department of Labor Protection, Civil and Man-Made 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.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning and Heat and Gas Supply, 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: kolesnik.inna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5852-2392

³ Department of Geodesy, 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, tel. (0472) 51-15-56, e-mail: tyshchenkooleksandr56@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7303-6360

^{4*} Department of Labor Protection, Civil and Man-Made 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: smirnov0800@icloud.com, ORCID ID: 0009-0000-1341-1675

Abstract. The relevance of the work. According to statistical data and the conducted analysis, it was determined that due to the state of war in Ukraine, a significant number of energy facilities are in critical condition. The lack of electricity in Ukraine leads to a number of violations in ensuring the safety of the population's daily life. Thus, starting from June 2022, temporary power outage schedules have been introduced. The growth of economic indicators of the world economy leads to a gradual increase in the consumption of energy resources. **Purpose** – traditional energy sources with electricity for the uninterrupted operation of technological processes and ensure the safety of the population's daily life. **Methodology.** At the current level of scientific and technical progress of heat supply and electricity consumption, the use of organic fuels (coal, oil, gas), hydropower and nuclear energy based on thermal neutrons. However, according to the results of numerous studies, in the near future, organic fuel can only partially meet the needs of the world's energy industry. The rest of the electricity needs can be met at the expense of other sources of energy - non-traditional and renewable. **Scientific results.** Fossil sources are mainly used for energy production (about 87 % of all energy). The share of renewable energy is only 8.6 %. In addition, renewable energy is developing more actively in the developed countries of the world as a result of state subsidies. British Petroleum analysts forecast that by 2030, the share of energy sources obtained from fossil energy sources will decrease to 82 %, the share of renewable energy will increase to 12 %, and the relative amount of energy obtained from nuclear energy will not change significantly. Uncertainty of scientific and practical substantiation of priority directions for the use of renewable energy sources to meet the needs of facilities does not allow for wide application in Ukraine. **Practical results.** The use of renewable energy sources in the next 20 years will make it possible to save fossil energy resources, but the complete abandonment of fossil energy sources is a matter of a distant perspective. Therefore, one of the priority areas of energy development in the 21st century. there is comprehensive use of renewable energy sources, which have huge resources, which will reduce the negative impact of energy on the environment, increase energy and environmental security.

Keywords: *unconventional and renewable energy sources; life safety; safety of operation of buildings and structures; ensuring security; energy efficiency*

Вступ. Згідно статистичних даних та проведеного аналізу визначено, що у зв'язку з воєнним станом в Україні значна кількість об'єктів енергетики знаходиться в критичному стані [2–5]. Нестача електроенергії в Україні призводить до цілої низки порушень в забезпеченні безпеки життєдіяльності населення. Так починаючи з червня 2022 року введені тимчасові графіки відключення електроенергії (рис. 1).

Мета. Таким чином відсутність електроенергії нетрадиційних джерел енергії призводить до порушення безперервної роботи технологічних процесів та забезпечення безпеки життєдіяльності населення. Тому важливою задачею є забезпечення електроенергією з використанням нетрадиційних видів і джерел енергії.

Часові проміжки	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
Понеділок	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗
Вівторок	✗	✗	✗				✗	✗	✗	✗	✗	✗					✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
Середа	✗	✗	✗	✗	✗	✗				✗	✗	✗	✗	✗	✗					✗	✗	✗	✗	✗
Четвер	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
П'ятниця	✗	✗	✗				✗	✗	✗	✗	✗	✗					✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
Субота	✗	✗	✗	✗	✗	✗				✗	✗	✗	✗	✗	✗					✗	✗	✗	✗	✗
Неділя	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗				✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Рис. 1. Графіки відключення електроенергії (червень 2024 року)

Методика. При існуючому рівні науково-технічного прогресу тепlopостачання та електроспоживання, використання органічних палив (вугілля, нафта, газ), гідроенергії і атомної енергії на основі теплових нейтронів. Однак за результатами численних досліджень органічне паливо в недалекому майбутньому може задовольнити запити світової

енергетики тільки частково [1–3]. Решта електропотреб може бути задоволена за рахунок інших джерел енергії – нетрадиційних і поновлюваних.

Основні результати досліджень. Відповідно до резолюції № 33/148 Генеральної Асамблеї ООН (1978 рік) **до нетрадиційних і відновлювальних джерел енергії відносяться:** сонячна, вітрова, геотермальна, енергія морських хвиль, припливів і океану, енергія біомаси, деревини, деревного вугілля, торфу, тяглової худоби, сланців, бітумінозних пісковиків і гідроенергія великих і малих водотоків. Класифікація нетрадиційних і відновлювальних джерел енергії представлена в таблиці 1.

Таблиця 1

Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

Джерела первинної енергії	Природне перетворення енергії	Технічне перетворення енергії	Вторинна споживана енергія
Земля	Геотермальне тепло Землі	Геотермальна електростанція	Електрика
Сонце	Випаровування атмосферних опадів	Гідроелектростанції (напірні і вільнопотокові)	
	Рух атмосферного повітря	Вітроенергетичні установки	
	Морські течії	Морські електростанції	
	Рух хвиль	Хвильові електростанції	
	Танення льодів	Льодовикові електростанції	
Планети	Припливи і відливи	Електростанції на біомасі	
		Фотоелектрика	

Зростання економічних показників світової економіки призводить до поступового збільшення споживання енергетичних ресурсів.

Країни, які розвиваються, спричиняють загальне збільшення енергоспоживання за останні 10–15 років. Причинами цього є більший приріст ВВП цих країн і достатньо висока енергоємність виробництва. Основними споживачами енергії серед країн, що розвиваються, є Китай та Індія.

Якщо обсяг споживання викопних джерел енергії буде залишатись на рівні

2012 року, то розвіданих запасів вистачить на наступну кількість років: нафти – на 53 роки, природного газу – на 56 років, вугілля – на 109 років [4; 5].

Запасів урану, основного ядерного палива, за нинішніх темпів споживання вистачить на декілька тисяч років. Ціна енергії, отримана від цього виду палива є одною з найнижчих. За умови дотримання всіх заходів з техніки безпеки атомна енергетика значно менше впливає на навколишнє середовище, ніж викопні джерела енергії. Однак ризик техногенних катастроф, можливість створення ядерної зброї на основі палива для атомних електростанцій, сповільнюють розвиток цього виду енергетики [4; 5].

Гідроенергетика також належить до відновлювальних джерел енергії. Розрізняють велику і малу гідроенергетику. Потенціал великої енергетики в світі використовують на досить високому рівні (біля 50 %) з поступовим введенням в експлуатацію нових потужностей. Однак техногенний вплив на навколишнє середовище за умови експлуатації об'єктів гідроенергетики є значним [2; 4]. Структуру споживання енергоресурсів показано на рисунку 2.

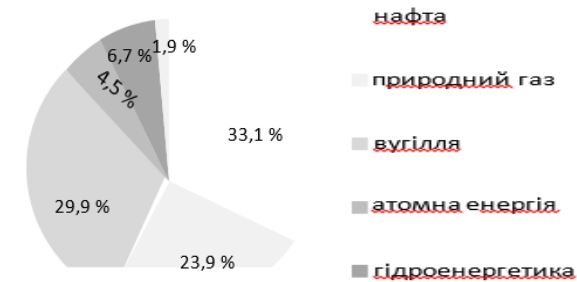
З рисунку 2 можна зробити висновок, що для виробництва енергії переважно використовують викопні джерела (біля 87 % усієї енергії). Доля відновлювальної енергетики складає лише 8,6 %. До того ж відновлювальна енергетика активніше розвивається у розвинутих країнах світу внаслідок державних дотацій.

За прогнозами аналітиків компанії *British Petroleum* до 2030 року частка енергоносіїв, отриманих з викопних джерел енергії, зменшиться до 82 %, частка відновлювальної енергетики зросте до 12 %, а відносна кількість енергії, отримана від ядерної енергетики, зміниться не значно. Динаміку зміни споживання енергії показано на рисунку 3.

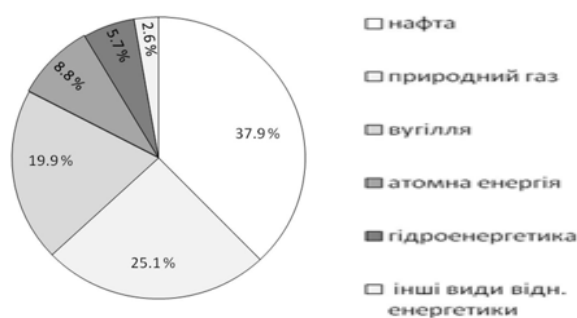
З аналізу прогнозних даних рисунку 3, можна зробити такі висновки:

- використання відновлювальних джерел енергії найближчі 20 років дасть змогу заощадити викопні енергоресурси;

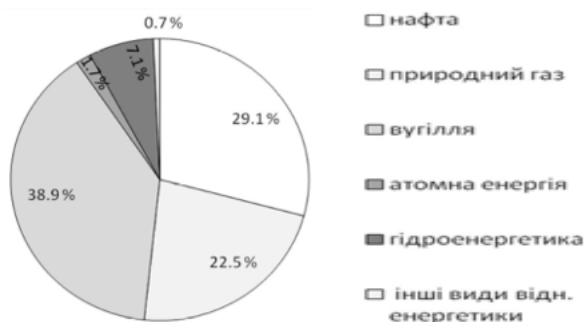
- цілковита відмова від викопних джерел енергії – справа далекої перспективи.



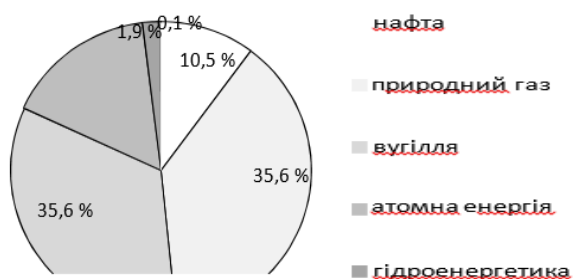
а – весь світ



б – розвинені країни



в – країни, що розвиваються



г – Україна

Рис. 2. Структура споживання енергоресурсів

Тому одним з пріоритетних напрямків розвитку енергетики в XXI ст. є всебічне використання відновлювальних джерел

енергії, які мають величезні ресурси, що дозволить знизити негативний вплив енергетики на довкілля, підвищити енергетичну і екологічну безпеку [1].

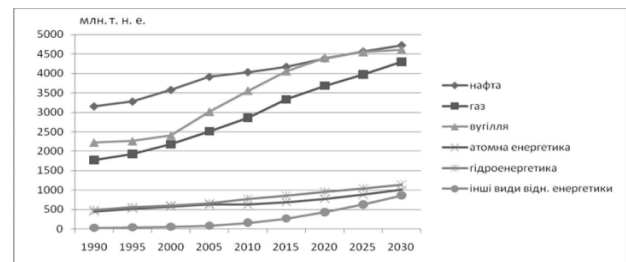


Рис. 3. Прогноз споживання енергоресурсів до 2030 року

До нетрадиційних (альтернативних) відносяться відновлювальні джерела енергії (ВДЕ), які використовують потоки енергії Сонця, енергію вітру, теплоти Землі, біомаси, морів і океанів, річок, існуючих постійно або періодично в навколишньому середовищі й у майбутній перспективі практично невичерпані. Всі ВДЕ поділяються на дві групи, що використовують пряму енергію сонячного випромінювання і її вторинні прояви (побічна сонячна енергія), а також енергію взаємодії Сонця, Місяця і Землі. Потенціал відновлювальної енергетики України представлено в таблиці 2 [2–4].

Таблиця 2

Потенціал відновлювальної енергетики України

№ з/п	Напрямок відновлювальної енергетики	Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал,	
		млн т. у. п.	млн т. н. е.
1.	Вітроенергетика	28,0	19,6
2.	Сонячна енергетика	6,0	4,2
2.1	– електрична	2,0	1,4
2.2	– теплова	4,0	2,8
3.	Гідроенергетика	7,0	4,9
3.1	Велика гідроенергетика	5,0	3,5
3.2	Мала гідроенергетика	2,0	1,4
4.	Біопаливо	31,0	21,7
5.	Геотермальна теплова	30,0	21
Загальний обсяг		102	71,4

На даному етапі більшість галузей відновлювальної енергетики розвивається за державної підтримки [1]. Для цього використовують ряд механізмів:

- ратифікація міжнародних угод з енергозбереження (Київський протокол, Енергетична хартія);

- затвердження національних програм з розвитку відновлювальної енергетики, в рамках яких:

- енергію, вироблену відновлювальним и джерелами, держава закупає за вищим, «зеленим» тарифом, ніж у інших виробників;

- виробникам енергії з відновлювальних джерел надають податкові пільги;

- для енергоносіїв з відновлювальних джерел енергії надають квоти на ринку енергоресурсів.

В Україні діють дві національні програми з енергозбереження:

- державна цільова економічна програма енергоефективності на 2010–2015 роки;

- енергетична стратегія України на період до 2030 року.

Висновки

1. Згідно проведеного нами аналізу визначено, що у зв'язку з воєнним станом в Україні значна кількість об'єктів енергетики знаходиться в критичному стані. Нестача електроенергії в Україні призводить до цілої

низки порушень в забезпеченні безпеки життєдіяльності населення.

Таким чином відсутність електроенергії нетрадиційних джерел енергії призводить до порушення безперебійної роботи технологічних процесів та забезпечення безпеки життєдіяльності населення. Тому важливою задачею є забезпечення електроенергією з використанням нетрадиційних видів і джерел енергії.

2. Одним з пріоритетних напрямків розвитку енергетики в ХХІ ст. є використання відновлювальних джерел енергії в Україні, які мають величезні ресурси, що дозволить знизити негативний вплив енергетики на довкілля, підвищити енергетичну і екологічну безпеку.

3. Проведений аналіз використання різних видів і джерел енергії у світі і в Україні показав, що пріоритетним напрямком є використання, з урахуванням географічного положення України, сонячної енергії.

4. Тому проведення досліджень та науково-практичних обґрунтувань використання нетрадиційних видів енергії для безпеки експлуатації будівель і споруд є актуальною задачею для України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. Затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 1071.
2. Калда Г. С., Шевеля В. В., Беліков А. С. та ін. Безпека експлуатації альтернативних джерел енергії : навч. посіб. 2020. 197 с.
3. Данілов М. П., Ветвицький І. Л., Чесанов Л. Г., Колесник І. О. Теплостійкість будівель в екосистемі «довкілля – будівля – людина» (аварійно-дефіцитні теплові режими, геліо- та вітрові аспекти) : навч. посіб. Дніпропетровськ : Поліграфіст, 2005. 262 с.
4. Кривцов В. С., Олейников О. М., Яковлев О. І. Невичерпна енергія : Кн. 3. Альтернативна енергетика. Харків : НАУ «ХАІ», Севастополь : СНТУ, 2006. 643 с.
5. Соловей О. І., Лега Ю. А., Розен В. П., Ситник О. О., Чернявський А. В., Курбаса Г. В. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії : навч. посіб. Черкаси : ЧДТУ, 2007. 483 с.
6. Атлас енергетичного потенціалу нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії. Київ, 2008. 54 с.
7. Buckley C., Scott N., Snodin H., Gardner P. Review of Impacts of High Wind Penetration in Electricity Networks. Garrad Hassan Pacific Limited, 2005. 181 p.

REFERENCES

1. *Enerhetychna stratehiya Ukrayiny na period do 2030 r. Zatverdzhena rozporядzhennyam Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 24.07.2013 № 1071* [Energy strategy of Ukraine for the period until 2030. Approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 07.24.2013 No. 1071] (in Ukrainian).
2. Kalda G.S., Shevelya V.V., Belikov A.S. and oth. *Bezpeka ekspluatatsiyi al'ternatyvnykh dzherel enerhiyi : navch. posib.* [Safety of operation of alternative energy sources : manual]. 2020, 197 p. (in Ukrainian).

3. Danilov M.P., Vetvytskyi I.L., Chesanov L.G. and Kolesnyk I.O. *Teplostiykist' budivel' v ekosystemi "dovkillya – budivlya – lyudyna" (avariyno-defitsytni teplovi rezhymy, helio- ta vitrovi aspekty) : navch. posib.* [Thermal resistance of buildings in the ecosystem “environment – building – man” (emergency deficit thermal regimes, solar and wind aspects) : education manual]. Dnipropetrovsk : Polygraphist Publ., 2005, 262 p. (in Ukrainian).

4. Kryvtsov V.S., Oleinikov O.M. and Yakovlev O.I. *Nevycherpna enerhiya : Kn. 3. Al'ternatyvna enerhetyka* [Inexhaustible Energy : Book. 3. Alternative Energy]. Kharkiv : NAU “KHAI” Publ., Sevastopol : SNTU Publ., 2006, 643 p. (in Ukrainian).

5. Solovei O.I., Lega Yu.A., Rosen V.P., Sytnyk O.O., Chernyavskiy A.V. and Kurbasa G.V. *Netradytsiyni ta ponovlyuvani dzherela enerhiyi : navchal. posibnyk* [Non-traditional and renewable energy sources : study manual]. Cherkasy : ChDTU publ., 2007, 483 p. (in Ukrainian).

6. *Atlas enerhetychnoho potentsialu netradytsiynykh ta vidnovlyuvanykh dzherel enerhiyi* [Atlas of energy potential of unconventional and renewable energy sources]. Kyiv, 2008, 54 p. (in Ukrainian).

7. Buckley C., Scott N., Snodin H. and Gardner P. Review of Impacts of High Wind Penetration in Electricity Networks. Garrad Hassan Pacific Limited, 2005, 181 p.

Надійшла до редакції: 12.11.2024.

УДК 622.834.5:614.8.01

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.31.1126

УДОСКОНАЛЕННЯ ВІБРОАКУСТИЧНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЮ ПОШКОДЖЕНОСТІ ГЕОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

БЄЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
СЛАЦОВ І. М.^{2*}, *докт. техн. наук, с. н. с.*,
КОРОТАЄВ В. М.³, *канд. юрид. наук*,
БАРАБАНОВ С. С.⁴ *канд. техн. наук, ас.*,
ДЕМЧЕНКО В. В.⁵ *магістр, 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*} Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 746-01-51, e-mail: gtmigtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2432-9092

³ Дніпропетровський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр Міністерства внутрішніх справ України, Турик Будівельний, 1, 49033, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 732-16-93, e-mail: exp-walter@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0269-0389

⁴ Кафедра охорони праці та цивільної безпеки, НТУ «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 744-62-19, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X

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) 756-34-73, e-mail: demchenko.pdaba@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-1596-1010

Анотація. *Постановка проблеми.* Методика віброакустичного контролю вимагає подальшого вдосконалення, особливо в частині встановлення зв'язків між вимірюваними діагностичними параметрами та характерними дефектами структури середовища. Необхідна інтеграція даних і розробка показників ризику втрати стійкості геотехнічної системи для автоматичного розпізнавання дефектів, з урахуванням застосування саме віброакустичного методу. *Мета дослідження.* Удосконалення метода віброакустичного контролю руйнування споруд і пошуку локалізації тріщин в гірничих виробках, підземних і заглиблених спорудах різного призначення. *Методика.* Аналіз та узагальнення експериментальних даних віброакустичної діагностики, аналітичні методи класичної теорії хвиль. *Результати.* Розглянуті: передумови застосування та основні параметри віброакустичного методу контролю геотехнічних споруд; особливості використання методики віброакустичного контролю для оцінки пошкодженості елементів геотехнічної системи; методи інтерпретації результатів віброакустичної діагностики; оцінка ризиків втрати стійкості геотехнічних споруд віброакустичним методом. Для визначення тріщин і пошкоджень в гірничих виробках, підземних і заглиблених спорудах різного призначення встановлені і систематизовані зв'язки основних параметрів віброакустичної діагностики (амплітуди, тривалості та частоти максимуму спектральної щільності сигналу) з характерними дефектами та пошкодженнями елементів геотехнічної системи. Удосконалено і розширено метод оцінки зміни структури середовища та втрати стійкості аварійно небезпечних об'єктів внаслідок виникнення систем тріщин в процесі їх експлуатації. Визначено поточні і комплексні показники ризику втрати стійкості геотехнічної системи за результатами виявлення зовнішніх та прихованих структурних пошкоджень методами візуальної і віброакустичної діагностики. Це дозволяє контролювати структурні порушення та ряд інших критично значущих параметрів, які впливають на безпеку експлуатації споруд, оцінити ризики втрати стійкості геотехнічної системи та своєчасно провести ремонтні роботи. *Наукова новизна.* Подальший розвиток отримав метод віброакустичного контролю руйнування споруд, що відрізняється урахуванням зв'язків між діагностичними параметрами та характерними дефектами структури середовища, а також показників ризиків втрати стійкості геотехнічної системи. *Практична значимість.* Розроблено і впроваджено рекомендації щодо застосування віброакустичного методу для пошуку тріщин у виробках та спорудах.

Ключові слова: *геотехнічні споруди; віброакустична діагностика; методи пошуку локалізації тріщин; ризики втрати стійкості*

IMPROVING THE VIBROACOUSTIC METHOD FOR CONTROL OF DAMAGE TO GEOTECHNICAL STRUCTURES

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
SLASHCHOV I.M.^{2*}, *Dr. Sc. (Tech.), Sen. Res.*,
KOROTAIEV V.M.³, *Ph.D. (Juridical)*,
BARABANOV S.S.⁴, *Ph.D. (Tech), Ass.*,
DEMCHENKO V.V.⁵, *Master of Sc., Doct. 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 Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Department of Mining at Great Depths, The M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Simferopolska Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 746-01-51, e-mail: gtmigtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2432-9092

³ Dnipropetrovsk Scientific Research Forensic Center of the MIA (Ministry of Internal Affairs) of Ukraine, 1, Budivelniiy Dead End, Dnipro, 49033, Ukraine, tel. +38 (056) 732-16-93, e-mail: exp-walter@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-0269-0389

⁴ Department of Labour Protection and Civil Safety, Dnipro University of Technology, 19, D. Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 744-62-19, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X

⁵ 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 Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, email: demchenko.pdaba@gmail.com, ORCID ID: 0009-0001-1596-1010

Abstract. Problem statement. The vibroacoustic monitoring method requires further improvement, especially in establishing clear links between the measured diagnostic parameters and characteristic defects of the environment structure. It is necessary to integrate data and develop risk indicators of the geotechnical system stability loss for automatic recognition of defects, taking into account the use of the vibroacoustic method. **Purpose of the study.** Improvement of the vibroacoustic method for structures destruction control and search of the cracks localization in mine workings, underground and deep structures of various purposes. **Methods.** Analysis and generalization of experimental data of vibroacoustic diagnostics, analytical methods of classical wave theory. **Research results.** The following are considered: prerequisites and main parameters of the vibroacoustic method of monitoring geotechnical structures; features of using the vibroacoustic monitoring technique to assess the damage of elements of a geotechnical system; methods for interpreting the results of vibroacoustic diagnostics; assessment of the stability loss risks of geotechnical structures using the vibroacoustic method. To determine cracks and damage in mine workings, underground and deep structures of various purposes, the relationships between the main parameters of vibroacoustic diagnostics (amplitude, duration and frequency of the signal maximum spectral density) with characteristic defects and damage to elements of the geotechnical system have been established and systematized. The method for assessing changes in the structure of the environment and the loss of hazardous objects stability as a result of the occurrence of crack systems during their operation has been improved and expanded. Current and complex indicators of the geotechnical system loss stability risk have been determined based on the results of the external and hidden structural damage detection using visual and vibroacoustic diagnostics. This allows monitoring structural damage and a number of other critical parameters that affect the safety of the structures operation, assessing of the geotechnical system stability loss risks and carrying out repair work in a timely manner. **Scientific novelty.** The method of the structures destruction vibroacoustic control was further developed, which is distinguished by taking into account the relationships between diagnostic parameters and characteristic defects in the structure of the environment, as well as indicators of the geotechnical system stability loss risks. **Practical significance.** Recommendations for using the vibroacoustic method for cracks searching in workings and structures have been developed and implemented.

Keywords: *geotechnical structures; vibroacoustic diagnostics; methods of searching for crack localization; risks of loss of stability*

Постановка проблеми. В умовах суттєвого збільшення кількості та інтенсивності надзвичайних ситуацій у геотехнічних спорудах, спричинених динамічними впливами від вибухів, пожежами, землетрусами, а також технологічними аваріями необхідність

проведення контролю стійкості стає першочерговим завданням. Це важливо для забезпечення не тільки безпеки людей, але й запобігання економічним втратам, спричиненим руйнуванням об'єктів та інфраструктури. Контроль стійкості дозволяє виявляти потенційні зони ризику,

оцінювати поточний стан об'єктів та прогнозувати їхню поведінку в умовах довготривалих експлуатаційних навантажень.

Ця проблема особливо актуальна для таких об'єктів, як гірничі виробки, інфраструктурні вузли (наприклад, мости та дороги), виробничі цехи, тунелі, поглиблені споруди, житлові будинки та допоміжні споруди. Вплив на стійкість споруд різних факторів потребує комплексного підходу, що включає, насамперед, сучасні технології неруйнівного моніторингу, аналітичні моделі та методи аналізу результатів.

Для пошуку локалізації тріщин в спорудах різного призначення використовуються методи віброакустичної діагностики [1–5]. Роль віброакустичного методу неруйнівного контролю геотехнічних об'єктів має кілька незаперечних переваг. Насамперед, метод не вимагає руйнування або пошкодження досліджуваних конструкцій, що дозволяє проводити діагностику без зупинки експлуатації об'єктів або додаткових витрат на їх відновлення. Також віброакустичний метод має високу чутливість до дефектів, що дозволяє виявляти мікротріщини, зони ослабленого зчеплення, внутрішні порожнечі та інші приховані дефекти, які не помітні під час візуального або стандартного технічного огляду. Ці переваги роблять віброакустичний метод одним із ключових інструментів для забезпечення надійності та безпеки геотехнічних об'єктів, особливо в умовах зростаючих вимог до довговічності та експлуатаційної придатності інфраструктури.

Однак методика віброакустичного контролю вимагає подальшого вдосконалення, особливо в частині встановлення чітких зв'язків між вимірюваними діагностичними параметрами та характерними дефектами структури середовища. Це зв'язано з кількома основними чинниками, які вимагають подальшого вдосконалення методу.

Насамперед слід розширювати можливості методу з урахуванням унікальності акустичних властивостей

різних матеріалів (гірських порід, бетонів). По-друге, для підвищення точності визначення тріщин та інших структурних пошкоджень (особливо на критично важливих об'єктах) необхідна інтеграція віброакустичного методу з іншими методами діагностики (наприклад, з візуальним та ультразвуковим контролем). Комбінування з іншими діагностичними підходами потребує розробки алгоритмів інтеграції даних та інтерпретації результатів комплексного моніторингу. По-третє, для ідентифікації характерних дефектів потрібно розширення бази даних акустичних сигналів [6; 7], що відповідають певним видам дефектів (тріщинам, зонам ослаблення або порожнечам). Ідентифікація пошкодженої споруди та розробка комплексних показників ризику втрати стійкості геотехнічної системи дозволяє розвивати методи автоматичного розпізнавання дефектів на основі аналізу вхідних сигналів.

Мета дослідження – удосконалення методу віброакустичного контролю руйнування споруд і пошуку локалізації тріщин в гірничих виробках, підземних і заглиблених спорудах різного призначення.

Результати досліджень.

1. Передумови застосування та основні параметри віброакустичного методу контролю геотехнічних споруд.

Віброакустичний метод засновано на реєстрації коливань об'єктів, що виникають під дією удару. Коливання фіксують сейсмоприймачами. До виконання віброакустичних досліджень проводиться візуальний огляд об'єкту контролю.

Віброакустична діагностика може бути включена в технологічний процес для запобігання раптовим обвалам та своєчасного виявлення тріщин або порожнин.

На ділянках з просіданнями підосви або фундаменту, віброакустичний метод використовується, у тому числі, для відносної оцінки розподілу напружень.

Основні параметри віброакустики:

- тривалість коливального процесу;
- максимальна амплітуда коливань;

- спектральний склад отриманих коливань.

Відгук компонента системи «кріплення – порода» на ударне збудження залежить від резонансу та згасання пружних коливань у породі або конструкції. Наявність порожнин і тріщин викликає збільшення амплітуди та тривалості коливань, а також появи резонансних піків у спектрі.

Слід відзначити, що глибина дослідження прямо пропорційна потужності ударного впливу та відстані між точкою збудження та точкою прийому. При цьому база контролю вибирається не меншою за товщину досліджуваного об'єкта.

Дефекти матеріалу в елементах геотехнічної системи проявляються рядом характерних змін параметрів пружних коливань. Серед них – зниження амплітуди та тривалості коливань, що вказує на порушення цілісності матеріалу. Одночасно спостерігається зсув піку спектральної щільності в область нижчих частот, що свідчить про перерозподіл пружних властивостей матеріалу.

Ослаблення зв'язку між бетонними або залізобетонними блоками призводить до суттєвого зниження амплітуди коливань, що ускладнює передачу енергії удару від одного елемента до іншого. Це може бути результатом тріщин, розривів чи погіршення якості контакту сполучних шарів. Крім того, збільшення напружень впливає на динамічні характеристики коливань. Це пояснюється зміною внутрішніх механічних властивостей матеріалу під дією навантажень, що може бути корисним індикатором для оцінки стану конструкції та виявлення зон потенційної руйнації.

2. Особливості використання методики віброакустичного контролю для оцінки пошкодженості геотехнічної системи.

Методи віброакустичного профілювання та зондування, як правило, використовуються для ідентифікації пошкодженості гірського масиву, підземних виробок, заглиблених та інших геотехнічних споруд. На рисунку 1, а показано схеми поздовжнього та взаємоперпендикулярного профілювання на одній або різних

рівновеликих базах. Поздовжнє акустичне профілювання може виконуватися вздовж криволінійного профілю, наприклад, уздовж криволінійного елемента споруди. Детальність контролю (крок, база) визначаються поставленим завданням.

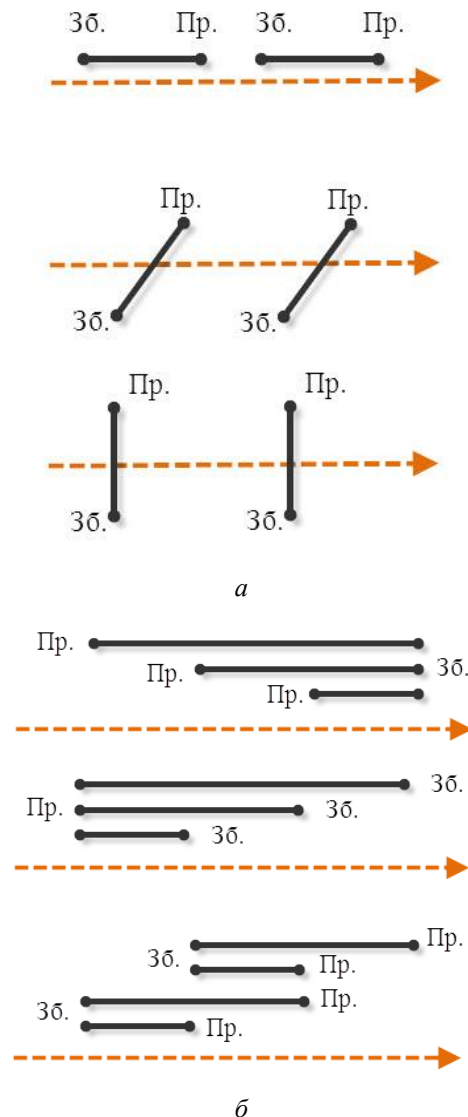


Рис. 1. Схеми віброакустичної діагностики геотехнічної системи: а – профілюванням; б – зондуванням у глибину

На рисунку 1, б показані схеми віброакустичної діагностики – профілюванням і зондуванням у глибину зі зміщенням збудувача (на схемі – «Зб.»), приймача (на схемі – «Пр.»).

Вимірювання виконуються після вибору та розмітки початкової точки. На ділянці, що обстежується, відзначають профілі з встановленим лінійним кроком (наприклад, 1 м), інші профілі прокладаються

паралельно з таким же кроком у вертикальній площині. Для виявлення прихованих дефектів в окремих складових геотехнічної системи або ділянок з нещільним механічним зв'язком дослідження проводять у вузлах сформованої сітки. База контролю послідовно зсувається на один крок до охоплення всієї зони обстеження. Для оцінки якості механічного зв'язку між елементами кріплення або визначення глибини тріщини, базу контролю обирають симетричною щодо тріщини чи межі розділу елементів.

При обстеженні ділянок бетонних блоків або тубінгів, які мають регулярну структуру, діагностика може виконуватися

для кожного елемента окремо. Це дозволяє більш точно діагностувати стан кожного елемента та сприяє покращенню точності оцінки всієї геотехнічної системи. При цьому крок контролю визначається кроком установки кріплення. При оцінці якості кріплення або стійкості оголення профілі проводять так, щоб вони перетинали тріщинуваті ділянки та інші прояви деформування.

Первинна реєстрація показників щодо кожного профілю здійснюється на схемі перерізу. Крім встановлення середнього значення, на схемі відображаються візуально виявлені структурні дефекти. Приклад приведено на рисунку 2.

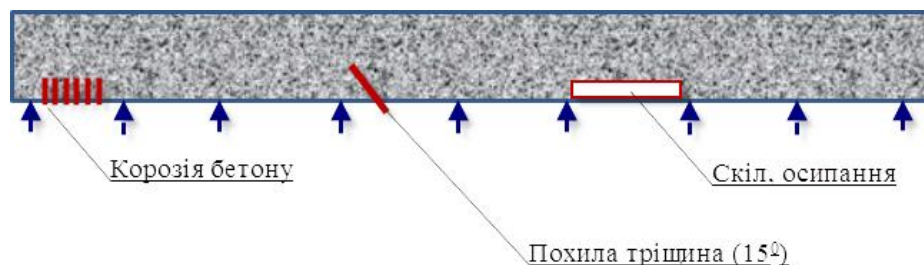


Рис. 2. Приклад реєстрації результатів віброакустичної діагностики

Віброакустичним методом визначають амплітуди коливань, які характеризують стан об'єкту. виміри повторюють з періодичністю 2–4 рази на рік, залежно від інтенсивності зростання сколів, осипань, внутрішніх дефектів і тріщин. За отриманими даними виконують діаграми зміни напружень та зростань пошкодженості.

Якщо є така потреба, може бути здійснена оцінка якості закладення армування. Такий контроль виконується за варіантами: завдання удару і прийом коливань на розстрілах армування; нанесення удару по армуванню, а прийом коливань з поверхні кріплення; нанесення удару по поверхні кріплення та прийом коливань на армуванні. Вибір варіанта залежить від інформативності апаратури, що застосовується, маси армованих елементів, варіанта їх кріплення. Найбільш продуктивний перший варіант, але при

відпрацюванні первинної методики випробовуються всі три варіанти.

Переваги віброакустичного методу для оцінки якості встановленого кріплення базуються на високій оперативності, об'єктивності та неруйнівному характері контролю. Зокрема, оцінка якості наблизьбетонного кріплення здійснюється методом поздовжнього профілювання по контуру взаємно перпендикулярним профілями. Ефективність значно покращується, якщо перед нанесенням бетону здійснити контроль якості оборки віброакустичним методом.

Оцінка пошкодженості незакріплених ділянок гірничих виробок, тунелів та інших заглиблених споруд виконується з метою оперативного виявлення заколів та тріщин з подальшою оборкою. Вибір точок діагностики здійснюється за місцем проведення робіт. Результати діагностики не документуються. Виняток становлять ділянки явних структурних порушень, які

при подальшій експлуатації можуть мати негативний вплив на стійкість гірничих виробок і споруд.

3. Інтерпретація результатів віброакустичної діагностики.

Функціональний зв'язок інформативних параметрів віброакустичної діагностики і типових дефектів та пошкоджень гірничих

виробок і підземних споруд представлена в таблиці 1.

Базові значення інформативних параметрів, з якими необхідно порівнювати отримані результати, залежать від типу використовуваних засобів та виду кріплення гірничих виробок і підземних споруд.

Таблиця 1

Зв'язок основних параметрів віброакустичної діагностики і характерних дефектів та пошкоджень елементів геотехнічної системи

Параметр, вид дефекту	Амплітуда	Тривалість	Частота максимуму спектральної щільності
Приховані порожнини та тріщини	зростає	зростає	знижується
Ділянки заколоутворення	зростає	зростає	може бути кілька максимумів
Нещільний контакт або наявність порожнеч	зростає	зростає	дещо знижується
Низька якість матеріалу	знижується	знижується	знижується
Високий рівень напружень без руйнування	знижується	знижується	дещо зростає
Збільшення напружень	зменшується	незначно зменшується	в діапазоні частот (0,06–0,6) кГц
Зменшення напружень	збільшується	зростає	

Параметри попередньо визначаються на непорушених ділянках. На кожній ділянці беруть не менше десяти точок. Базові значення параметрів розраховують шляхом знаходження середнього арифметичного по всій сукупності вимірів. Якщо неможливо попередньо провести таріровку на еталонних ділянках усі отримані дані усереднюють і аномальними вважають значення, що відрізняються від середнього більш ніж на 30 %. При використанні віброакустичного методу реєструється амплітуда, частота та час коливань. Оцінка результатів проводиться у разі найбільшої з амплітуд коливань у частотних смугах, що відображається індикатором спектра.

На основі матеріалів з окремих розрізів будується розгортка поверхні досліджуваної ділянки. З урахуванням результатів візуальних та інструментальних спостережень виконується інтерпретація сукупності даних. Після виділення точок з аномальними значеннями параметрів, їх об'єднують в аномальну ділянку з певною ознакою та наносять на план, як показано на рисунку 3. Рисунок супроводжується короткою текстовою частиною про

особливості гірничої виробки або заглибленої споруди, прояви аномалій та умови у випадку коли вони не можуть бути відображені графічно. За результатами віброакустичної діагностики складається узагальнююча текстова частина, яка включається до складу висновку комісії, що проводить комплексне обстеження. Узагальнюючі результати подають за спеціальною формою.

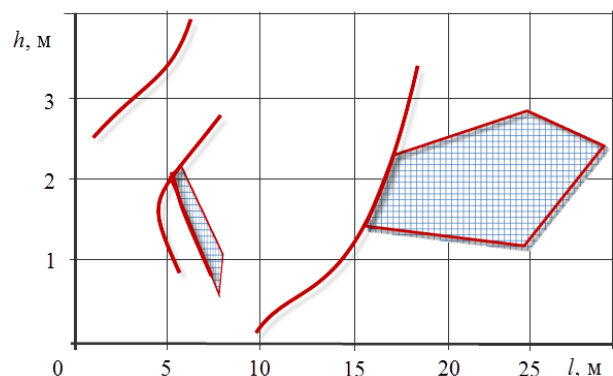


Рис. 3. Схема подання результатів віброакустичної діагностики із зазначенням тріщин, заколів які візуально спостерігаються та ділянок прихованих систем тріщинуватості

4. Оцінка ризиків втрати стійкості геотехнічних споруд віброакустичним методом.

Ризики раптових обвалів гірських порід, несучих конструкцій або загальної втрати стійкості геотехнічної системи за фіксований період часу є наслідками впливу комплексу негативних природних та техногенних факторів [3–5; 8]. Критичними для втрати стійкості будь-якого елемента геотехнічної системи є пошкодження, що можуть бути визначені за зовнішніми признаками або за параметрами контролю внутрішнього стану об'єкта контролю [5; 7–11]. Тому для оцінки оперативного (в даний момент часу) рівня безпеки при експлуатації геотехнічних споруд запропоновані дві групи показників ризику:

– перша група визначається за результатами візуальних спостережень середовища або споруди:

$$\begin{cases} R(F)^v = k_1^v R(F_1)^v + k_2^v R(F_2)^v + \dots + k_i^v R(F_i)^v; \\ i \in [1; n^v]; \\ k_1^v + k_2^v + \dots + k_i^v = 1; \\ k_i^v \in [0; 1]; \\ R(F_i)^v \in [0; 1]. \end{cases} \quad (1)$$

– друга група визначається за результатами віброакустичної діагностики:

$$\begin{cases} R(F)^a = k_1^a R(F_1)^a + k_2^a R(F_2)^a + \dots + k_j^a R(F_j)^a; \\ j \in [1; n^a]; \\ k_1^a + k_2^a + \dots + k_j^a = 1; \\ k_j^a \in [0; 1]; \\ R(F_j)^a \in [0; 1]. \end{cases} \quad (2)$$

де $R(F)^v$, $R(F)^a$ – показники ризиків виникнення аварійної ситуації від факторів, що визначаються візуальним і віброакустичним методами, відповідно; i, j – індекси до кількості факторів n^v і n^a , відповідно; k_1^v , k_1^a – коефіцієнти впливу на ризик окремих факторів в групі.

Слід зазначити, що для автоматизованих систем контролю безпеки важливим є не тільки оперативні данні з безпеки за окремими групами ризику але й загальний стан об'єкта контролю. Цей стан може бути визначений інтегральним показником

ризик. Цей показник, що характеризує ступінь втрати стійкості елементів геотехнічної системи може бути визначений або шляхом порівняння і вибору максимального ризику в групах, що обчислюються за співвідношеннями (1) і (2), або підсумовуванням ризиків за цими двома групами факторів:

$$R(F)^{int} = \begin{cases} \max \left\{ \sum_{i=1}^{n^v} k_i^v R(F_i)^v; \sum_{j=1}^{n^a} k_j^a R(F_j)^a \right\}; \\ kv * \sum_{i=1}^{n^v} k_i^v R(F_i)^v + ka * \sum_{j=1}^{n^a} k_j^a R(F_j)^a \quad (3) \\ kv \in [0; 1]; \\ ka \in [0; 1]; \\ kv + ka = 1.. \end{cases}$$

де $R(F)^{int}$ – показник інтегрального ризику втрати стійкості геотехнічної системи; kv, ka – коефіцієнти впливу на інтегрований ризик груп факторів, що визначаються візуальним і віброакустичним методами, відповідно.

Оперативний та інтегральний показники ризиків втрати стійкості геотехнічної системи, який, як вже було вказано, є індикаторами поточного та загального стану об'єкта контролю, визначається в процесі періодичного візуального і віброакустичного моніторингу.

В результаті проведених досліджень методологія контролю пошкодженості геотехнічних споруд удосконалена і розширена шляхом систематизації і обґрунтування зв'язків основних параметрів віброакустичної діагностики з характерними дефектами та пошкодженнями елементів геотехнічної системи, а також визначення поточних і комплексних показників ризику руйнування геотехнічної системи за результатами виявлення зовнішніх структурних пошкоджень методами візуального контролю та прихованих пошкоджень віброакустичним методом.

Розроблено «Методичні рекомендації з оцінки пошкодженості конструктивних елементів будівель і споруд віброакустичним методом для забезпечення безпеки їх експлуатації». З використанням цих рекомендацій проводять ідентифікацію

пошкоджень та тріщин в елементах будівель і споруд, у тому числі в умовах надзвичайних ситуацій. Методичні рекомендації впроваджено в ГУ ДСНСУ у Дніпропетровській області та використовуються в навчальному процесі підготовки фахівців вищої освіти.

Висновки

1. Для визначення руйнування споруд і пошуку локалізації тріщин в гірничих виробках, підземних і заглиблених спорудах різного призначення встановлені і систематизовані зв'язки основних параметрів віброакустичної діагностики (амплітуди, тривалості та частоти максимуму спектральної щільності сигналу) з характерними дефектами та пошкодженнями елементів геотехнічної системи.

2. Удосконалено і розширено метод оцінки зміни структури середовища та втрати стійкості аварійно небезпечних

об'єктів внаслідок виникнення систем тріщин в процесі їх експлуатації, який відрізняється визначенням поточних і комплексних показників ризику втрати стійкості геотехнічної системи за результатами виявлення спостережуваних зовнішніх та прихованих внутрішніх структурних пошкоджень методами візуальної і віброакустичної діагностики. Це дозволяє контролювати структурні порушення та ряд інших критично значущих параметрів, які впливають на безпеку експлуатації підземних виробок і споруд, оцінити ризики втрати стійкості геотехнічної системи та своєчасно провести ремонтні роботи.

3. Розроблено і впроваджено методичні рекомендації, які використовують для визначення пошкоджень та тріщин в елементах будівель і споруд, у тому числі в умовах надзвичайних ситуацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Левіт В. В., Усаченко Б. М., Яланський А. О., Сергієнко В. М. Геофізична діагностика шахтних стволів з метою технічного обслуговування та ремонту кріплення. *Геотехнічна механіка*. ІГТМ НАНУ, 2000. № 20. С. 130–133.
2. Скіпочка С. І., Сергієнко В. Н. Апаратура «ШВК-1» для віброакустичного контролю стану масиву. *Геотехнічна механіка*. ІГТМ НАНУ, 2014. № 119. С. 79–86.
3. Singh A. K., Chen B., Tan V. B. et al. A theoretical and numerical study on the mechanics of vibro-acoustic modulation. *The J Acoust Soc America*. 2017. Vol. 141 (4). Pp. 2821–2831.
4. Karve P., Miele S., Neal K. et al. Vibro-acoustic modulation and data fusion for localizing alkali-silica reaction-induced damage in concrete. *Struct Heal Monit*. 2020. Vol. 19. Pp. 1905–1923.
5. Яланський О. А., Беліков А. С. та ін. Ідентифікація геомеханічних та геотехнічних структур віброакустичним методом для систем автоматизованого контролю стійкості наземних споруд та гірничих виробок. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2023. № 2 (53). С. 101–109.
6. Беліков А. С., Яланський О. А. та ін. Розробка моделей складних коливань для систем автоматизації віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 3 (021). С. 7–18.
7. Булат А. Ф., Слащова О. А., Слащов І. М., Стаднійчук М. М. Обґрунтування методів контролю геомеханічної безпеки на гірничих підприємствах. *Геотехнічна механіка*. ІГТМ НАНУ, 2020. № 150. С. 176–187.
8. Півняк Г. Г., Табаченко М. М., Дичковський Р. О., Фальштинський В. С. Керування ризиками в гірничодобувній діяльності. Дніпро : НГУ, 2015. 288 с.
9. Slashchov I., Bielikov A., Kulbach A. and Slashchova O. Forecasting the risks of the mine roadway destruction by the radiometric control method. *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1156. Pp. 012033.
10. Цопа В. Ризик-орієнтоване мислення: основи, навчання та впровадження. Ч. I. *Охорона праці*. 2017. № 8. С. 35–47.
11. Слащов І. М., Слащова О. А., Осінній В. Я., Сапунова І. О., Константинова І. Б. Ідентифікація факторів ризиків втрати стійкості гірничих виробок. *Геотехнічна механіка*. ІГТМ НАНУ, 2019. № 149. С. 209–222.

REFERENCES

1. Levit V.V., Usachenko B.M., Yalansky A.O. and Sergienko V.M. *Heofizychna diahnostyka shakhtnykh stvoliv z metoyu tekhnichnoho obsluhovuvannya ta remontu kriplennya* [Geophysical diagnostics of mine shafts for the purpose

of maintenance and repair of fastening]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical mechanics]. 2000, no. 20, pp. 130–133. (in Ukrainian).

2. Skipochka S.I. and Sergienko V.N. *Aparatura "SHVK-1" dlya vibroakustychnoho kontrolyu stanu masyvu* [Equipment "ShVK-1" for vibroacoustic monitoring of the massif state]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2014, no. 119, pp. 79–86. (in Ukrainian).

3. Singh A.K., Chen B., Tan V.B. et al. A theoretical and numerical study on the mechanics of vibro-acoustic modulation. *The J. Acoust Soc America*. 2017, vol. 141 (4), pp. 2821–2831.

4. Karve P., Miele S., Neal K. et al. Vibro-acoustic modulation and data fusion for localizing alkali–silica reaction–induced damage in concrete. *Struct Heal Monit*. 2020, vol. 19, pp. 1905–1923.

5. Yalanskyi O., Byelikov A., Barabanov S., Slashchova O. and Ikonnikov M. *Identyfikatsiya heomekhanichnykh ta heotekhnichnykh struktur vibroakustychnym metodom dlya system avtomatyzovanoho kontrolyu stiykosti nazemnykh sporud ta hirnychykh vyrobok* [Identification of geomechanical and geotechnical structures using the vibroacoustic method for automated stability monitoring systems of ground buildings and mine workings]. *Visti Donets'koho hirnychoho instytutu* [Journal of Donetsk Mining Institute]. 2023, no. 2 (53), pp. 101–109. (in Ukrainian).

6. Bielikov A.S., Yalanskyi O.A., Barabanov S.S., Slashchova O.A. and Ikonnikov M.Yu. *Rozrobka modeley skladnykh kolyvan' dlya system avtomatyzatsiyi vibroakustychnoho kontrolyu bezpeky ekspluatatsiyi budivel' i sporud* [Development of models complex oscillations for automation systems of vibroacoustic operational safety control of buildings and structures]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2024, no. 3 (021), pp. 62–72. (in Ukrainian).

7. Bulat A.F., Slashchova O.A., Slashchov I.M. and Stadnychuk M.M. *Obgruntuvannya metodiv kontrolyu heomekhanichnoyi bezpeky na hirnychykh pidpryyemstvakh* [Substantiation of methods of geomechanical safety control in the mining enterprises]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2020, no. 150, pp. 176–187. (in Ukrainian).

8. Pivnyak G.G., Tabachenko M.M., Dychkovsky R.O. and Falshtinsky V.S. *Keruvannya ryzykamy v hirnychodobuvnyi diyal'nosti* [Risk management in mining activities]. Dnipro : NGU Publ., 2015, 288 p. URL: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/146560>. (in Ukrainian).

9. Slashchov I., Bielikov A., Kulbach A. and Slashchova O. Forecasting the risks of the mine roadway destruction by the radiometric control method. *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 1156, pp. 012033.

10. Tsopa V. *Ryzyk-orientovane myslennya: osnovy, navchannya ta vprovadzheniya* [Risk-based thinking: basics, training and implementation]. *Okhorona pratsi* [Labor Protection]. 2017, no. 8, pp. 35–47. (in Ukrainian).

11. Slashchov I.M., Slashchova O.A., Osinniy V.YA., Sapunova I.O. and Konstantynova I.B. *Identyfikatsiya faktoriv ryzykiv vtraty stiykosti hirnychykh vyrobok* [Identification of risk factors of mine workings stability loss]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2019, no. 149, pp. 209–222. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 10.12.2024.

УДК 697.1:621.178:697.34

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.40.1127

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ КАМЕРИ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕПЛОГО ПОТОКУ НА РОБОЧИХ МІСЦЯХ

БЄЛІКОВ 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, метаталурійних та склоплавних виробництвах де використовуються високотемпературні технологічні процеси існує проблема перегріву працівників через значне теплове навантаження. При паспортизації робочих місць виникає необхідність вивчення та перевірка впливу теплового потоку на людину. А отже існує необхідність у розробці або модернізації приладів для оцінки терморадіаційної напруженості на робочих місцях 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; температури джерел випромінювання. **Мета статті** – з урахуванням визначення і візуалізації експрес методом не лише температури джерела випромінювання, а і теплового високотемпературного обладнання на працівника в реальних умовах – модернізація інфрачервоної камери. До основних завдань належить: розробка функціональної схеми; розробка конструкції установки; розробка алгоритма визначення теплового потоку з урахуванням факторів впливу на розповсюдження ІЧ променів. **Висновок.** На основі проведених досліджень модернізована тепла камера яка забезпечує здатність вимірювати розподіл температур на досліджуваній поверхні та інтенсивність теплового випромінювання, а також відстань до об'єкта. Забезпечувати одночасний збір даних про температуру та її зміни в часі в області яку охоплює тепла камера. Здійснювати візуалізацію розподілу теплового потоку на екрані для оперативної інтерпретації; Забезпечувати точність вимірювань 1 °С та роздільність 10 см на відстані від 10 м. Інтенсивність теплового потоку поверхні джерела випромінювання яку охоплює тепла камера може відображатись як інтегральне значення всієї поверхні так і згруповано за ділянками значення температури. Це істотно розширює функціонал порівняно з традиційними тепловими потокомірами.

Ключові слова: високотемпературні джерела випромінювання; алгоритм проведення розрахунку теплового потоку; термодинамічне навантаження на робочих місцях; модернізація інфрачервоної камери; паспортизація робочого місця

IMPROVEMENT OF THERMAL IMAGING CAMERA FOR ASSESSING HEAT FLOW IN WORKPLACES

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.pdaba.edu.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. In petrochemical, metallurgical, and glass production industries where high-temperature technological processes are employed, there is a problem of overheating of workers due to significant thermal loads. When certifying workplaces, there is a need to study and verify the impact of heat flow on humans. Therefore, there is a need for the development or modernization of devices for assessing thermal radiation stress in workplaces and conducting research in laboratory conditions close to real production situations, taking into account

atmospheric factors, the geometry of the premises, the geometry of primary and secondary IR radiation sources, and the temperature of radiation sources. When certifying workplaces, there is a need to study and verify the impact of heat flow on humans. **The main objectives include** – Modernization of an infrared camera for determining and visualizing, by express method, not only the temperature of the radiation source but also the thermal impact of high-temperature equipment on a worker in real conditions. The main tasks include: developing a functional diagram, designing the installation, and creating an algorithm to determine heat flow considering factors influencing the spread of IR radiation. Modernization of an infrared camera for determining and visualizing, by express method, not only the temperature of the radiation source but also the thermal impact of high-temperature equipment on a worker in real conditions. **Conclusion.** The modernized thermal camera enables the measurement of temperature distribution on the examined surface, the intensity of thermal radiation, as well as the distance to the object. It allows for simultaneous data collection on temperature and its changes over time in the camera's coverage area. Visualizing the distribution of heat flow on the screen for real-time interpretation; Ensuring measurement accuracy of 1 °C and a resolution of 10 cm at a distance of 10 m. The intensity of the thermal flux on the surface of the radiation source captured by the thermal camera can be displayed as both an integral value of the entire surface and grouped temperature values by sections. This significantly expands the functionality compared to traditional heat flux meters.

Keywords: *high-temperature radiation sources; thermal flux calculation algorithm; thermodynamic load on workplaces; infrared camera modernization; workplace certification*

Постановка проблеми. На петургійних, метаталурнійних та склоплавних виробництвах де використовуються високотемпературні технологічні процеси існує проблема перегріву працівників через значне теплове навантаження [5; 7]. При паспортизації робочих місць виникає необхідність вивчення та перевірка впливу теплового потоку на людину [2]. А отже існує необхідність у розробці або модернізації приладів для оцінки терморадіаційної напруженості на робочих місцях 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; температури джерел випромінювання [1].

Аналіз публікацій. Виходячи з проведеного аналізу сучасних приладів для вимірювання теплового потоку було визначено, що вони не в повній мірі дозволяють оцінити температуру та інтенсивність теплового потоку, з урахуванням відстані заміру від джерела випромінювання [3]. Крім того, відсутній прилад оцінки інтегрального значення накопичення теплової енергії об'єктом [4; 6]. Тому, нами було запропоновано концепцію удосконалення приладів для вирішення цієї задачі.

Працівники зазвичай на робочих місцях постійно підпадають під вплив різних спектральних частот випромінювання від нагрітих об'єктів у діапазоні від 3 до 15 мкм. Тому, в переважній більшості використовують два типи тепловізійних систем за діапазонами довжини хвилі від 3 до 5 мкм та від 8 до 12 мкм. Також, існують на підприємствах металургійної, петургійної та скло промисловостях короткохвильові тепловізійні системи, які працюють у діапазоні спектра від 1 до 3 мкм [8].

Мета дослідження – модернізація інфрачервоної камери для визначення і візуалізації експрес методом не лише температури джерела випромінювання а і теплового високотемпературного обладнання на працівника в реальних умовах. До основних завдань належить: розробка функціональної схеми; розробка конструкції установки; розробка алгоритма визначення теплового потоку з урахуванням факторів впливу на розповсюдження ІЧ променів.

Результати досліджень. Згідно проведеного нами аналізу літературних джерел [1] визначено, що на даний час тепловізійні системи умовно поділяються на декілька груп:

– перша група, за методом створення двомірного зображення спостережуваного простору. Тепловізійні системи поділяються на тепловізійні камери та тепловізійні скасканери;

– друга група, за використанням технологічної бази побудови тепловізійної

системи. I-покоління, II-покоління, III-покоління;

– третя група, за типом спектральної частоти при вимірювання. Короткохвильові тепловізійні системи (SW), середньохвильові тепловізійні системи (MW), довгохвильові тепловізійні системи (LW);

– четверта група, за областю використання теплових систем. Тепловізійні системи спостереження та вимірювальні тепловізійні системи.

Умовний розподіл існуючих тепловізійних систем зображено на рисунку 1.

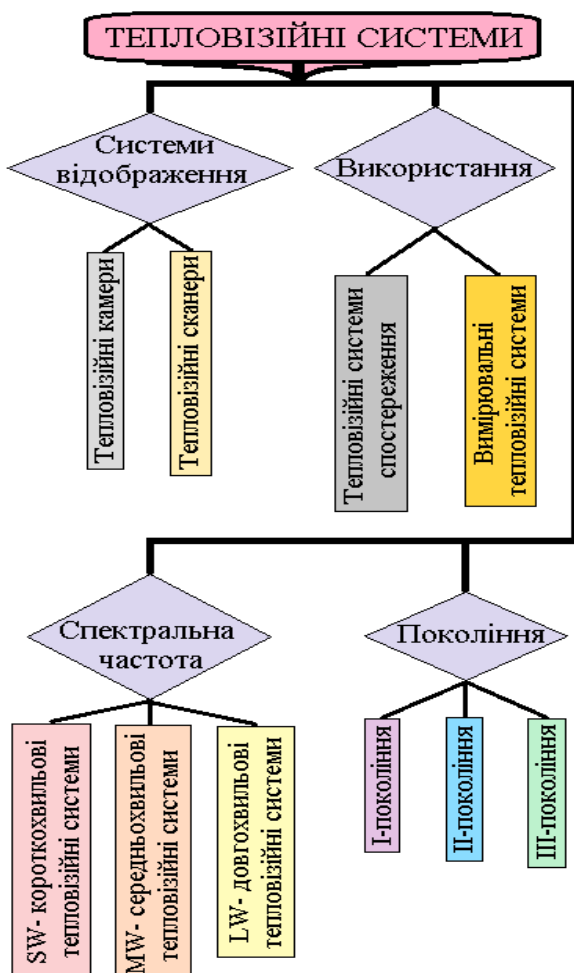


Рис. 1. Умовний розподіл тепловізійних систем

При виборі тепловізійної системи ми керувались закономірностями, основними перевагами та недоліками у їх технічних характеристиках:

– чим вищий призначений температурний діапазон роботи тепловізійної камери тим

вища роздільна здатність матриці, що забезпечить більш високу контрастність зображення та зменшення оптичного спотворення; більшу здатність до візуалізації об'єктів при багатьох об'єктах з більш високими температурами; але потребують більш якісну систему охолодження матриці;

– чим нищий призначений температурний діапазон роботи тепловізійної камери тим більше візуалізація в холодні періоди року та в умовах непогоди; більша стійкість до бликів сонця та вогню; більша візуалізація дрібних предметів; але більші завади візуалізації якщо у об'єктиві камери поряд з низькотемпературними об'єктами дослідження присутній високотемпературний об'єкт що переважає основний інформаційний сигнал більш ніж на порядок.

Вхідними даними для алгоритму удосконалення приладу нами визначені:

– термограми, які несуть інформацію про розподіл температури від джерела теплового випромінювання кожну секунду;

– частота отримання знімків (кількість кадрів за секунду) – 1 кадр за секунду;

– визначення відстані до досліджуваного об'єкта;

– отримання геометричних параметрів досліджуваної ділянки;

– розрахунок теплового потоку від джерела випромінювання.

Такі конкретні вимоги дозволять підібрати потрібну базу приладу та побудувати математичну модель для програмного забезпечення мікропроцесорної системи приладу.

При удосконаленні приладу нами було прийнято допущення:

1. Як базова конструкція приладу для оцінки терморадіаційної напруженості на робочих місцях прийнято інфрачервону камеру MLX-90640-D100 з можливістю роботи через I2C, яка при своїй невеликій роздільній здатності забезпечує достатній рівень визначення температури на відстані до 10 м з урахуванням розрахунку теплового потоку та геометрії джерела випромінювання. Зовнішній вигляд та умовно графічне зображення показано на рисунку 2.



Рис. 2. Зовнішній вигляд інфрачервоної камери MLX90640-D110

2. Прийнятий екран для виводу термограми 2,8'' 240x320 TFT ILI9341 з можливістю підключення сенсорної панелі та карти пам'яті. Зовнішній вигляд та умовно графічне зображення показано на рисунку 3.

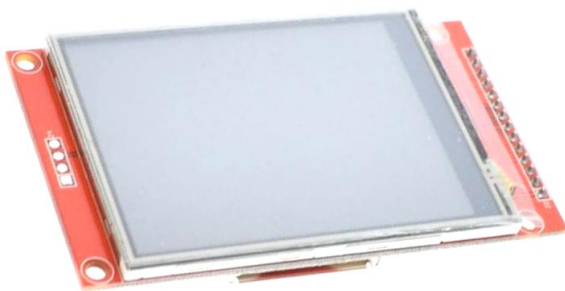


Рис. 3. Зовнішній вигляд екрана для виводу термограм 2,8'' TFT ILI9341

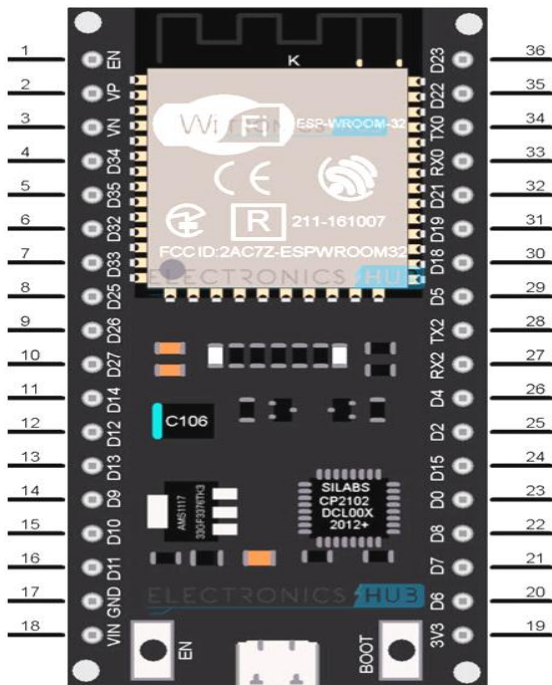


Рис. 4. Зовнішній вигляд мікроконтролера ESP32

3. Для обробки сигналів та даних обрано використовувати мікроконтролер ESP32. Він має у наявності WiFi, Bluetooth, можливість

обчислювати формули і виводити термограми на дисплей. Зовнішній вигляд та умовно графічне зображення показано на рисунку 4.

4. Як інтерфейс для передачі даних та підключення до ПК приймається протокол передачі через USB роз'єм та WiFi радіоканал.

5. Для визначення відстані до вимірювальної поверхні та обчислення геометричних розмірів. Приймаємо лазерний модуль LIDAR Lite v3. Зовнішній вигляд та умовно графічне зображення показано на рисунку 5.



Рис. 5. Зовнішній вигляд лазерного модуля LIDAR Lite v3

6. Елементи зібраного пристрою встановлені в пластиковий корпус, виготовлений за допомогою 3D-друку.

7. Запропонований нами алгоритм обробки сигналу на мові C++ рисунок 6, який враховує відстань і закон Стефана – Больцмана та перераховує покази камери не тільки в температуру, а і безпосередньо у значення теплового потоку ($Вт/м^2$). А саме перетворювати значення RGB матриці камери у $Вт/м^2$ шляхом підстановки у формулу Стефана – Больцмана.

На основі проведених досліджень та компоновки тепловізійної системи нами вперше запропонована структурна схема модернізованого тепловізійного вимірювального прилада, яка зображена на рисунку 7.

Згідно запропонованого нами алгоритма для визначення теплового поторку, нами розроблена математична модель, яка згідно закону Стефана – Больцмана визначає кількість теплової енергії яку випромінює об'єкт з урахуванням геометричних властивостей джерела випромінювання теплового потоку в реальних умовах.

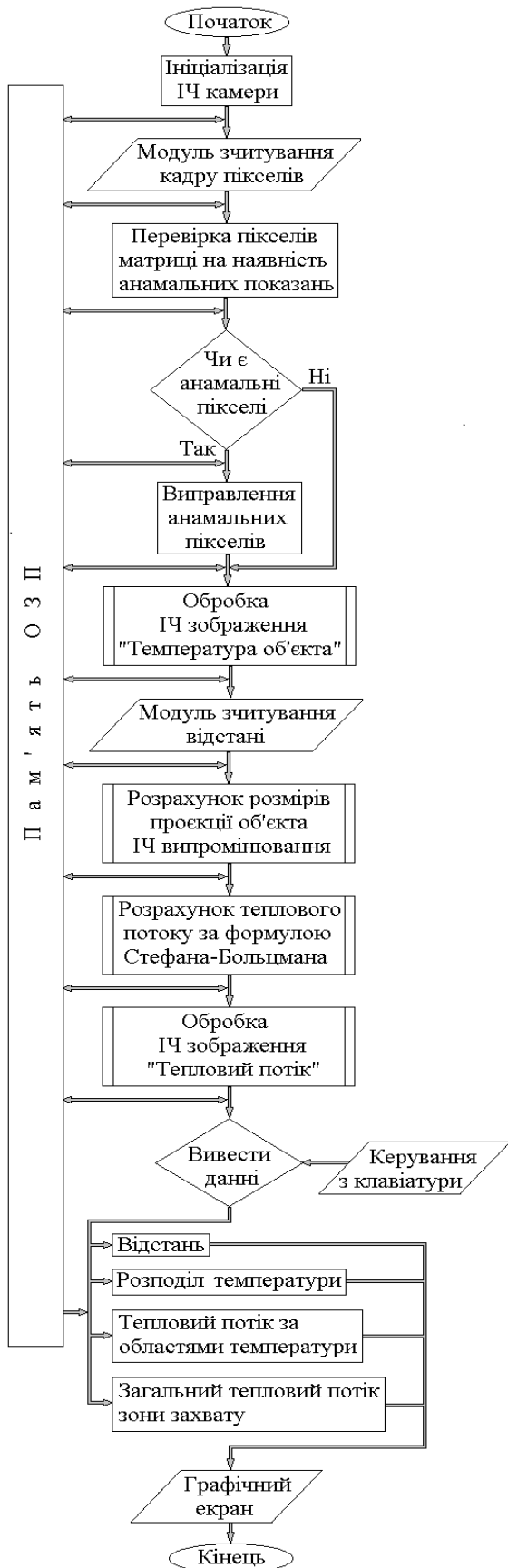


Рис. 6. Алгоритм обробки сигналу з тепловізійної камери

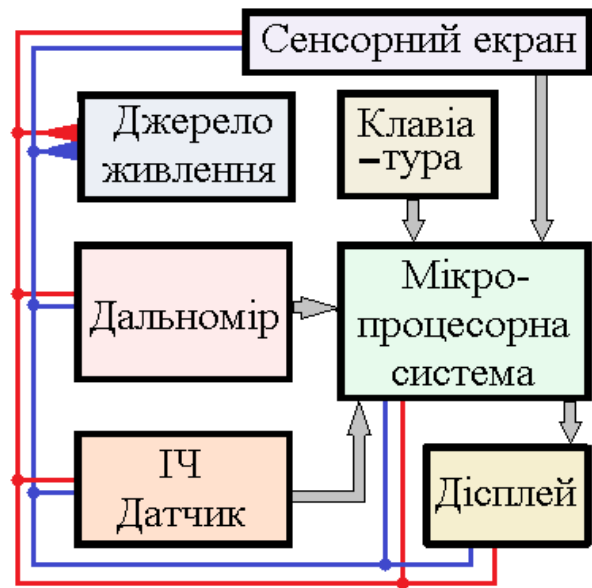


Рис. 7. Структурна схема побудови модернізації тепловізійного приладу

Тому після перетворення формула має вигляд :

$$Q = C_1 \times S \times ((T_1 \div 100)^4 - (T_2 \div 100)^4), \quad (1)$$

де:

C_1 – коефіцієнт випромінювання у Вт/(м²*ср*μ);

S – площа випромінювальної поверхні у м²;

T_1 – температура джерела випромінювання у Кельвінах;

T_2 – температура навколишнього середовища, в якому знаходиться джерело випромінювання у Кельвінах.

При розрахунках теплового потоку нами враховано коефіцієнт випромінювання при температурі в конкретний момент часу робочого процесу об'єкта випромінювання, який залежить від випромінювальної здатності матеріала ϵ [4].

Проведений нами аналіз програмного забезпечення для моделювання теплового випромінювання систем опалення. Встановлено лінійну залежність ϵ від температури джерела. При різних значеннях температури змінюється лише кут k нахилу графіку залежності ϵ (рис. 8).

Тобто, кут k є нахилом прямої, який розраховується як відношення різниці прямокутних координат точок до різниці їх абсцис. Але для його визначення потрібно знати коефіцієнт випромінювання при діючому значенні температури при дослідженні $C_1(T_2)$.

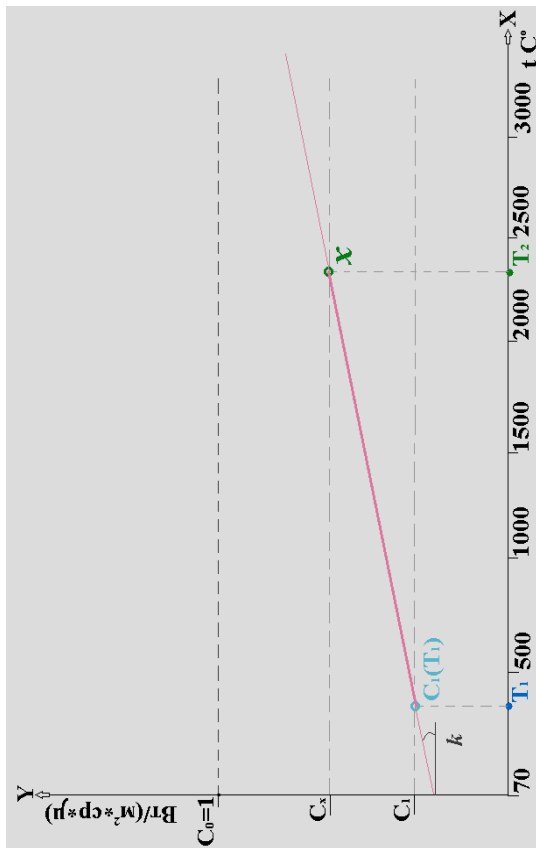


Рис. 8. Залежність випромінювальної здатності матеріала ϵ від температури об'єкта

Для визначення ϵ , знаючи температуру, матеріал та довідникові данні C_1 для цього матеріалу нами пропонується така послідовність розрахунків:

- визначаємо C_1 із довідника та приймаємо, що $C_1 = C_1(T_1)$;
- приймаємо припущення, що залежність $C_1(T)$ є лінійною;
- побудувати пряму, що проходить через точки $(T_1, C_1(T_1))$ та (T_2, x) , де x – невідоме;
- за формулою прямої функції розраховуємо x та отримуємо $C_1(T_2)$;
- підставляємо $C_1(T_2)$ у функцію для ϵ .

Тоді формула лінійної функції для ϵ буде мати вигляд:

$$Y_x - Y_1 = k(X_x - X_1), \quad (2)$$

де:

Y_1, X_1 – координати однієї з відомих точок $(T_1, C_1(T_1))$;

Y_x, X_x – координати не відомої точки $(T_2, C_1(T_2))$;

k – кут нахилу прямої лінійної функції ϵ .

Підставимо:

$$C_1(T_2) - C_1(T_1) = k(T_2 - T_1), \quad (3)$$

де:

$C_1(T_1)$ – коефіцієнт випромінювання з довідника у $Вт/(м^2 \cdot ср \cdot \mu)$;

$C_1(T_2)$ – коефіцієнт випромінювання при діючому значенні температури при дослідженні у $Вт/(м^2 \cdot ср \cdot \mu)$.

Тоді знайдемо кут нахилу прямої лінійної функції k :

$$k = (Y_2 - Y_1) \div (X_2 - X_1). \quad (4)$$

Підставляємо визначені величини у формулу:

$$k = (C_1(T_2) - C_1(T_1)) \div (T_2 - T_1). \quad (5)$$

Тому формула після скорочення для визначення другої точки $C_1(T_2)$ лінійної функції ϵ буде мати такий вигляд:

$$C_1(T_2) = C_1(T_1) + k(T_2 - T_1). \quad (6)$$

Таким чином, підставляючи k в формулу, ми обчислюємо значення C_1 для другої температури T_2 , використовуючи лінійну залежність від відомого з довідника $C_1(T_1)$. Тоді ми можемо побудувати пряму, яка проходить через відомі точки $(T_1, C_1(T_1))$ та (T_2, x) , де x – обчислений параметр $C_1(T_2)$.

Висновки

1. На основі проведеного дослідження модернізована теплова камера, яка дозволяє вимірювати розподіл температур на досліджуваній поверхні та інтенсивність теплового випромінювання, а також відстань до об'єкта. Забезпечувати одночасний збір даних про температуру та її зміни в часі в області яку охоплює теплова камера. Та здійснювати візуалізацію розподілу теплового потоку на екрані для оперативної інтерпретації.

2. Створений алгоритм обробки сигналів з камери дозволив переводити отримувані дані у фізичні одиниці теплового потоку та температури. Що дозволяє проводити якісний аналіз отриманих значень.

3. Інтерфейсне програмування дає змогу виводити термограми у реальному масштабі та часі на зовнішні пристрої. Це суттєво розширює функціонал пристрою.

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. Shalennyy V.T., Shalomov V.A. and Papirnyk R.B. *Napriamki udoskonalennia suchasnykh tekhnologiy, materialiv i obladannia iz vrakhuvanniam energetychnykh vutrat ta umov pratsi budivel'nykh robnikiv* [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. Bilikov A.S., Shalomov V.A., Ragimov S.Yu. and Mukhaylov M.O. *Fizychne modeliuвання zminu energetychnogo vplivu na robochi mista z urakhuvanniam vysokotemperaturnogo vyprominiuвання* [Physical modeling of changes in energy impact on workplaces taking into account high-temperature radiation]. *Visnyk Prudniprovs'koi derzhpavoi akademii budivnytstva ta arkhitekturn* [Bulletin of the Prydniprovaska 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 modeliuвання 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 vplivu 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 problemi 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 vplivu 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]. *Ukrainskiy zhurnal budivnytstva ta arkhitekturn* [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 vplivu teplovogo viprominyuvannya na robochih miscyah z urahuvanyam zabrudneniya povitryanogo seredovisha* [To the question of the complex assessment of the impact of heat radiation at workplaces taking into account air pollution]. *Ukrainskiy zhurnal budivnytstva ta arkhitekturn* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 6, pp. 7–15. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.12.24.

УДК 614.841.45

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.47.1128

ВПЛИВ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ

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,

ЯВОРСЬКА О. О.⁵, *докт. техн. наук, проф.*

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: krekniin.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 та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: yavorska.o.o@nmu.one, ORCID ID: 0000-0001-5516-5310

Анотація. Постановка проблеми. Дерев'яні конструкції широко використовуються у будівництві як в Україні, так і в усьому світі. Вони мають багато переваг відносно інших будівельних матеріалів, що особливо ціниться при зведенні житлових та громадських будівель. Однак, деревина є горючим матеріалом і при наявності джерела високої температури здатна стійко підтримувати горіння. На сьогодні не існує практичних і перевірених методів оцінки вогнестійкості таких конструкцій. З огляду на це, виникає необхідність у подальшому теоретичному дослідженні процесів нагрівання та горіння деревини під час пожеж. Для кращого розуміння складного процесу горіння доцільно розділити його на окремі характерні стадії, що можуть суттєво впливати на оцінку вогнестійкості конструкцій. **Мета статті** полягає в аналітичному вивченні впливу високих температур на несучу здатність дерев'яних конструкцій, зокрема в умовах пожеж. Розглядаються деструктивні процеси, що відбуваються в деревині під час нагрівання, які призводять до зниження її міцності навіть без видимих ознак вигорання. Стаття також акцентує увагу на необхідності подальшого теоретичного вивчення процесів тепломасоперенесення для оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій. **Висновок.** Дерев'яні конструкції мають багато переваг, однак їх вогнестійкість залишається проблемою через схильність деревини до займання. Важливою загрозою є не тільки вигорання, але й деструктивні процеси, які можуть знижувати міцність конструкцій без видимих ознак займання. Складність процесу горіння ускладнює розробку надійних методів оцінки вогнестійкості, тому необхідні подальші дослідження. Запропоновані математичні моделі можуть допомогти краще зрозуміти процеси тепломасообміну та покращити методи оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій.

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

THE IMPACT OF HIGH TEMPERATURES ON THE LOAD-BEARING CAPACITY OF WOODEN STRUCTURES

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,

YAVORSKA O.O.⁵, *Dr. Sc. (Tech.), 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: kreknnin.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 Labour Protection and Civil Safety, Dnipro University of Technology, 19, D. Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: yavorska.o.o@nmu.one, ORCID ID: 0000-0001-5516-5310

Abstract. Problem statement Wooden structures are widely used in construction both in Ukraine and globally. They offer numerous advantages over other building materials, which is particularly valued in the construction of residential and public buildings. However, wood is a combustible material, and in the presence of a high-temperature source, it can sustain burning. Recent scientific studies have increasingly focused on the destructive processes occurring in wood under the influence of high temperatures, particularly the burnout of surface layers of the structure to a critical level, which may lead to collapse. However, insufficient attention has been paid to other destructive changes that can reduce the integrity and load-bearing capacity of wood without visible signs of burning. The complexity and interdependence of different stages of the wood combustion process make it difficult, and sometimes impossible, to accurately assess its fire resistance and develop effective methods to improve the fire resistance of wooden structures. Currently, there are no practical and tested methods for assessing the fire resistance of such structures. Given this, there is a need for further theoretical research into the processes of heating and burning of wood during fires. To better understand the complex combustion process, it is advisable to divide it into characteristic stages, which can significantly influence the assessment of the structure's fire resistance. **Purpose of the article** to analyze the impact of high temperatures on the load-bearing capacity of wooden structures, particularly in fire conditions. The article examines destructive processes occurring in wood during heating, which lead to a reduction in its strength even without visible signs of burning. The article also emphasizes the need for further theoretical studies of heat and mass transfer processes to assess the fire resistance of wooden structures. **Conclusion.** Wooden structures have many advantages, but their fire resistance remains a challenge due to the combustibility of wood. A significant threat is posed not only by burning but also by destructive processes that can weaken the structures without visible signs of ignition. The complexity of the combustion process complicates the development of reliable fire resistance assessment methods, thus necessitating further research. The proposed mathematical models can help better understand the processes of heat and mass transfer and improve methods for assessing the fire resistance of wooden structures.

Keywords: *building materials; fire-resistant coating; high temperature; fire hazard; burning of materials; flammability of materials; building structures*

Постановка проблеми. Дерев'яні конструкції широко застосовуються в будівництві в світі та Україні. При цілій низці позитивних якостей деревини є органічність, комфортність що особливо ціниться при зведенні житла, побутових закладів. В той же час деревина є горючим матеріалом і при присутності високотемпературного джерела здатна стійко горіти. В той же час в останніх наукових роботах все більше уваги приділяється деструктивним процесам які протікають в деревині при дії високих температур з точки зору вигорання попередньої площини конструкцій до критичного значення, що призводить до обрушення конструкцій. В той же час недостатньо уваги приділяється іншим деструктивним процесам, які притікають в

деревині, що може привести до втрати її цілісності, зниження несучої здатності без видимих ознак вигорання.

Складність і взаємозв'язок різних стадій процесу горіння деревини ускладнюють, а іноді й унеможливають оцінку вогнестійкості та підвищення вогнестійкості будівельних дерев'яних конструкцій. Тому для дерев'яних конструкцій нині немає перевірених практично методів оцінки вогнестійкості.

У зв'язку з цим, для більш повного розуміння процесів, що відбуваються, виникла необхідність подальшого теоретичного вивчення прогріву і горіння деревини при вогневому впливі на пожежі. Розглянемо складний процес горіння, умовно розбиваючи його на характерні

стадії, які можуть суттєво вплинути на оцінку вогнестійкості конструкції.

Мета статті полягає в аналітичному вивченні впливу високих температур на несучу здатність дерев'яних конструкцій, зокрема в умовах пожеж. Розглядаються деструктивні процеси, що відбуваються в деревині під час нагрівання, які призводять до зниження її міцності навіть без видимих ознак вигорання. Всі ці питання потребують подальшого теоретичного вивчення процесів тепломасоперенесення для оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій.

Результати досліджень. У деревині, яка є капілярно-пористим тілом, суттєву роль на тепло- і масоперенос надає пористість і вміст води. Пористість деревини коливається у широкому інтервалі

$$q_i = \sum_{k=1}^m L_{ik} X_k, L_{ik} = L_{ki}; i = 1, 2, \dots, m,$$

де – q_i – потік субстанції (наприклад потік тепла); X_k – термодинамічні рушійні сили (градієнт температури тощо); L_{ik} – так звані феноменологічні коефіцієнти [8], L_{ii} – пов'язані з дією прямого ефекту для

$$x_t = -\frac{\nabla T}{T}, \quad (2.1)$$

а перенесення речовини:

$$x_u = -T\nabla\left(\frac{\mu}{T}\right), \quad (2.2)$$

де – хімічний потенціал, під яким розуміють роботу, що витрачається збільшення числа молекул у системі на

$$q_t = -L_{tt}\nabla T / T - L_{tu}T\nabla(\mu / T), \quad (2.3)$$

$$q_u = -L_{ut}\nabla T / T - L_{uu}T\nabla(\mu / T), \quad (2.4)$$

де $L_{uu} = L_{uu}$, згідно з принципом взаємності, коли вплив різних потоків один на одного рівнозначний [3;4]. З формул (2.3.), (2.4.) видно, що перенесення енергії визначається як теплової рушійної силою

$x_t = -\frac{\nabla T}{T}$, а й дією масообмінної

та багато в чому залежить від виду деревини (для дуба – 58 %, для ялини до 73 %). Кількість адсорбційної та капілярно-конденсаційної води, наявність пор та мікропустот їх характер, а також присутність полімолекулярних прошарків у стінках клітин деревини визначають капілярні явища та ефузійне перенесення тепла та води при вогневому впливі на деревину [1; 2].

Для опису взаємопов'язаних процесів перенесення тепла та води в даний час широкого поширення набув метод, названий термодинамікою незворотних процесів, в основі якого лежать принципи лінійності та мікроскопічної оборотності. З цих принципів випливають феноменологічні співвідношення [3–6].

даного потоку, L_{ik} – з ефектом, що накладає.

Термодинамічною силою перенесення енергії є:

одиночку, при сталості всіх інших змінних. Звідси вирази потоків енергії q_t і речовини q_u набувають вигляду:

сили $x_u = -T\nabla\left(\frac{\mu}{T}\right)$, а перенесення

речовини визначається як прямою силою x_u , і теплообмінною силою x_t .

Після деяких перетворень [7] систему рівнянь (2.3), (2.4) можна записати у вигляді

$$q_q = -\lambda_q \nabla T - \lambda_u \delta' T \nabla \theta, \quad (2.5)$$

$$q_u = -\lambda_u \nabla \theta - \lambda_u \delta \nabla T, \quad (2.6)$$

де $\nabla \theta = \nabla \mu$ – градієнт ізотермічного хімічного потенціалу; $q_q = q_t - I_{qu}$ – потік тепла; I_{qu} – питома ентальпія системи; λ_q і λ_u – коефіцієнти тепло-і масо(волого)провідності відповідно; коефіцієнт $\delta' = \frac{1}{T} \frac{L_{uq}}{L_{uu}}$ – характеризує

потік речовини, викликаний градієнтом температури. З викладеного вище випливає, що температура є потенціалом перенесення тепла. Два тіла, що знаходяться в контактi, в стані теплової рівноваги мають однакову

температуру і різний тепломісток. Аналогічна картина має місце при перенесенні вологи

На першому етапі – прогрівання та сушіння деревини математичний опис цих процесів заснований на системі диференціальних рівнянь тепломасоперенесення [3; 4]. При переносі теплоти локальна похідна від об'ємної концентрації ентальпії за часом дорівнює дивергентності щільності потоку ентальпії, що передається за рахунок теплопровідності або дифузійного та молярного руху:

$$c\rho_0 \frac{dT}{d\tau} = \text{div}(\lambda \nabla T) + \sum_i q_i - \sum_i (q'_{i\text{диф}} + q'_{i\text{мол}}) c_i \nabla T, \quad (2.7)$$

де $c = c_0 + \sum_i c_i u_i$ – наведена питома теплоємність тіла; ρ_0 – щільність тіла; λ – теплопровідність тіла; q_i – щільність внутрішніх джерел теплоти, $q'_{i\text{диф}}, q'_{i\text{мол}}$ – дифузійне та конвективне перенесення субстанції відповідно, друге доданок

праворуч – джерело тепла; третій доданок – конвективний член.

Рівняння потоку маси для колоїдного капілярного тіла, яким є деревина, з урахуванням того, що сума джерел вологи $\sum_i q'_i = 0$, має вигляд:

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} = \text{div}(a' \rho_0 \nabla u + a' \delta \rho_0 \nabla T), \quad (2.8)$$

де τ – час, u – концентрація вологи, a' – коефіцієнт дифузії, $a' \delta$ – коефіцієнт термодифузії, T – температура тіла.

Джерело тепла в рівнянні (2.7) зазвичай виражають через критерій фазового переходу ε [8–9], що є відношенням

кількості влог, що переноситься. Крім того, конвективний член у процесах теплової обробки невеликий порівняно з кондуктивним, тому рівняння (2.7) спроститься:

$$c\rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \nabla T) + \rho_0 \varepsilon r_{\text{ф}} \text{div}(a' \nabla u + a' \delta \nabla T), \quad (2.9)$$

де $r_{\text{ф}}$ – теплота фазового переходу, ε – коефіцієнт стисливості.

За наявності градієнта загального тиску наведена система рівнянь доповнюється рівнянням визначення тиску P :

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{R_\mu T}{\Pi_0 \mu^*} \left[\nabla (K_p \nabla P) + \varepsilon \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} \right] + \frac{P}{T} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (2.10)$$

де $n_0 = \frac{\omega}{m_n}$ – пористість матеріалу;

$\varepsilon \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}$ – джерело вологи; ω –

концентрація пари всередині матеріалу;

μ^* – молекулярна маса пари; R_μ –

універсальна газова постійна;

$K_p = K / \eta$ – коефіцієнт молярного

перенесення; K – коефіцієнт проникності; η

– коефіцієнт в'язкості. У наведених

рівняннях передбачається рівність

температури твердого скелета деревини та

середовища всередині її (пар, повітря,

рідина). Таке припущення може призвести

до помітних похибок при

високоінтенсивних процесах теплової

обробки. І тут можна використовувати

складніші двотемпературні постановки

завдань теплопереносу запропоновані

А. В. Ликовим та А. К. Облівіним [1; 3; 8].

Методи розрахунку процесів теплового

впливу на деревину до займання можна

звести до двох груп, усередині яких

розрахункову схему уніфіковано:

1. Процеси, у яких немає фазових

перетворень чи перетворення не

супроводжуються переміщенням їх межі.

$$c(t, \tau, x) \rho(t, \tau, x) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \mu(x) \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(t, \tau, x) \frac{\partial t}{\partial x} \nu(x) \right) + \varepsilon r_{tm} \rho_0 \frac{\partial u}{\partial x} + z(t, \tau, x) \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \mu(x) \frac{\partial}{\partial x} \left\{ a'(u, \tau, x) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \delta(u, \tau, x) \frac{\partial t}{\partial x} \right) \nu(x) \right\}, \quad (2.12)$$

де c – питома теплосмність, ρ – щільність,

t – температура, λ – теплопровідність, ε –

критерій фазового переходу, r_{tm} – теплота

фазового переходу, ρ_0 – щільність сухої

деревини, вологопровідність, u – величина

вмісту вологи, $\mu(x), \nu(x)$ – коефіцієнти

форми. Рівняння (2.11.) та (2.12.) ідентичні

для зовнішньої та внутрішньої зон з різними

теплофізичними параметрами. Вони

універсальні і придатні як для плоских (при

$\mu(x) = 1$ і $\nu(x) = 1$), так і для

Початкові умови:

2. Процеси, у яких є виражений рух межі фазових перетворень (випаровування) всередині тіла.

До першої групи належать два основні випадки (чисте нагрівання): нагрівання сирової деревини за $t_0 < 0^0$ С без випаровування вологи і при сушінні після попереднього прогріву, коли практично стабільне поле температури, а при нагріванні – поле вологості.

У другій групі можна виділити два основні випадки: прогрівання деревини за $t_0 < 0^0$ С без випаровування вологи, високотемпературний процес сушіння. Характерним для аналізованих процесів є утворення двох зон по перерізу, межа між якими рухома, а поле потенціалів у зонах (температура, вологість) розвиваються за різними законами та змінюються стрибкоподібно.

Аналіз математичних формулювань всіх цих процесів показує, що для опису завдань прогріву та сушіння до моменту займання деревини можна ввести таке формулювання нестационарного крайового завдання тепломасоперенесення (для одновимірного за простором варіанта).

Диференціальні рівняння:

циліндричних виробів з дерева (при $\mu(x) = 1/r$ і $\nu(x) = 1/x$). Рівняння (2.11.)

включає в себе джерело тепла у вигляді

вологи, що підлягає фазовому переходу

всередині зон (друге доданок у правій

частині), а також конвективний член,

здатний врахувати перенесення тепла

вологою, що рухається (третій доданок у

правій частині), а рівняння – член, що

враховує термовологопровідність (другий

доданок у правій частині).

$$t(x,0)=t_0(x), \quad u(x,0)=u_0(x) \tag{2.13}$$

допускають розподіл температури і вмісту вологи у вигляді будь-яких заданих функцій.

Граничні умови (не симетричні) на поверхнях:
по теплу:

$$\alpha_1 [t_{c1}(\tau) - t|_{x=0}] - \lambda(t, \tau, x) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \tag{2.14}$$

де з боку вогнища пожежі вважаємо відомими:

температуру вогнища пожежі $t_{c1}(\tau) = t_0 + 3451g(8\tau + 1) > t_0$ при $\tau > 0$

сумарний коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_1 = \alpha_k + \frac{C_0 \varepsilon}{t_{c1}(\tau) - t_{x=0}(\tau)} \left\{ \left[\frac{t_{c1}(\tau)}{100} \right]^4 - \left[\frac{t_{x=0}(\tau)}{100} \right]^4 \right\},$$

де – коефіцієнт тепловіддачі за рахунок конвенції; C_0 – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла; ε – наведений коефіцієнт теплового випромінювання системи «гріюче середовище – поверхні

(Остання залежність описує температурно-часовий режим стандартного теплового впливу під час випробувань на вогнестійкість – режим «стандартної пожежі» [9]);

дерев'яного матеріалу, що обігріваються» На іншій поверхні палаючого матеріалу реалізуються умови конвективного теплообміну із середовищем, що має звичайну температуру:

$$\alpha_2 [t_{c2} - t|_{x=l}] - \lambda(t, \tau, x) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0, \tag{2.15}$$

за вологою задаємо щільність потоків вологи:

$$q_1(\tau) \Big|_{x=0} - \alpha_1(u_1, \tau, x) \rho_0(\tau, x) \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \tag{2.16}$$

$$q_2(\tau) \Big|_{x=l} + \alpha_2(u_1, \tau, x) \rho_0(\tau, x) \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0, \tag{2.17}$$

на межі фазового переходу:

$$t_1(\chi, \tau) = t_2(\chi) = t_{TM} = const; \tag{2.18}$$

$$u_1(\chi, \tau) = u_2(\chi, \tau) = u_{...} = const; \tag{2.19}$$

$$\left[\alpha_1(u_1, \tau, x) \frac{\partial u_1}{\partial x} + \alpha_1 \delta_1(u_1, \tau, x) \frac{\partial a_1}{\partial x} \right]_{x=\chi} = \left[\alpha_2(u_2, \tau, x) \frac{\partial u_2}{\partial x} + \alpha_2 \delta_2(u_2, \tau, x) \frac{\partial a_2}{\partial x} \right]_{x=\chi} \tag{2.20}$$

$$r_{\phi} \left[(1 - \varepsilon_1) q_1'(\tau) - (1 - \varepsilon_2) q_2'(\tau) \right]_{x=\chi} = \\ = \lambda_1(t_1, \tau, x) \left. \frac{\partial t_1}{\partial x} \right|_{x=\chi} - \lambda_2(t_2, \tau, x) \left. \frac{\partial t_2}{\partial x} \right|_{x=\chi} \quad (2.21)$$

З рівнянь (2.18), (2.19) випливає, що фазові переходи відбуваються при постійних значеннях потенціалів (температурі та вологовмісті). Рівняння (2.20)–(2.21) характеризують рівність потоків тепла та вологи на межі $x = \chi(\tau)$. При цьому остання умова включає потоки вологи і критерії фазового переходу в них \mathcal{E}_i . Система рівнянь (2.11) – (2.21), у зв'язку з нелінійністю, у

загальному випадку може бути вирішена лише чисельними методами, наприклад методом кінцевих різниць, з допомогою неявної інтегро-інтерполяційної схеми. З її допомогою можна промодельовувати процеси, що передують займанню та горінню деревини: нагрівання та високотемпературного сушіння деревини. Теплофізичні параметри при прогріванні та сушінні визначаються за такими залежностями [5; 9]:

питома теплоємність – $c_p \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right), c_p = 3,5t + 3200 - 2,18 \cdot 10^2 \times (130 - 100u)^{2,28},$

розмірність – $U - \frac{\text{кж}}{\text{кг}};$

теплопровідність – $\lambda \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}} \right),$

$$\lambda = \begin{cases} 0,00222u t + 10^{0,2951 \lg 100u - 1,022} & \text{если } 0,05 \leq u \leq 1,0 \\ (0,00131u + 0,0009)t + 10^{0,2951 \lg 100u - 1,022} & \text{если } 1,0 < u \leq 1,3 \end{cases};$$

коефіцієнт вологопровідності - теплообміну в режимі сушіння – $a_{\text{вл}} \left(\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right), a_{\text{вл}} = 10^{9,361 \lg(t+273) - 22,6} \cdot 10^{-10} - \alpha_{\kappa} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}} \right)$

для сосни, коефіцієнт конвективного

$$\alpha_{\text{в}} = 8,35(0,00625t_c + 21) \left(\frac{v}{0,0083t_c + 1,37} \right)^{0,8} \cdot l^{-0,2};$$

коефіцієнт вологообміну – $\alpha_{\text{вл}} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right) :$

$$\alpha_{\text{вл0}} = \left[0,527(t_c + 10)^{2,06} \cdot 10^{-4} + 0,04 \right] \times \\ \times \left[(5v + 3,5) - (0,0017v + 0,0116) \cdot (\phi - 45)^2 \right] 10^{-7},$$

де рівноважна вологість

$$W_p(\%), W_p = 10,6^{\phi} (0,0327 - 0,00015t) \cdot 100,$$

де ϕ – частки од.; щільність: $\rho \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right) :$

$$\rho = \begin{cases} \rho = \rho_0(1+u), & \text{если } u > 0,3 \\ \rho = \rho_0 \frac{(1+u) \cdot (100 - K_p \cdot 30)}{100 + K_p \cdot 100u}, & \text{если } u \leq 0,3 \end{cases};$$

поправка на щільність щодо теплопровідності λ –

$$K_\lambda = \frac{1}{1,864 - 0,00175\rho_0}.$$

Тут ρ_0 – базова щільність деревини. Процеси нагрівання деревини при $t_0 > 0^\circ\text{C}$ без випаровування вологи добре вивчені, тому зупинимося на деяких стадіях нагрівання деревини.

До досягнення вологості деревини температури кипіння рідини відбувається звичайний прогрів і сушіння.

При досягненні вологості деревини температури рівної температурі кипіння води (при $P = 0,1$ МПа, $t_{\text{кип}} = 100^\circ\text{C}$) випаровування вільної вологи переходить у кипіння. Починається так званий високотемпературний процес, що супроводжується стабілізацією температури деревини на рівні $t \geq t_{\text{кип}}$ і молекулярним перенесенням вологи під впливом внутрішнього надлишкового тиску, створюваного тільки паром. Така картина спостерігається у зв'язку з тим, що кипіння відбувається при температурі, при якій пружність парів рідини дорівнює тиску навколишнього простору, що призводить до витіснення повітря, а стабілізація температури пояснюється неможливістю підвищити температуру фази, що випаровується вище температури пароутворення до моменту перетворення всієї киплячої рідини в пар. Процес кипіння відбувається не по всьому перерізу одночасно, а на межі, яка внаслідок анізотропії може мати певну товщину. Після періоду википання вільної вологи по всьому перерізу встановлюється вологість $W < W_{\text{п.н.}}$ – вологості межі насичення клітинних стінок, і рух вологи тут визначається тими ж факторами, що і при низькотемпературному процесі, але протікає з більшою швидкістю.

На основі проведених аналітичних досліджень коротко розглянемо вплив стадії прогріву та висушування деревини у процесі

горіння на можливі зміни вогнестійкості дерев'яних конструкцій.

При високотемпературному нагріванні в режимі стандартної пожежі, коли $t_{c1}(\tau) = t_0 + 3451g(8\tau + 1) > t_0$ при $\tau > 0$., відбувається утворення двох зон перетину конструкції. Кордон між цими зонами рухливий і визначається відповідними умовами розвитку процесу (рівняння (2.18)–(2.21)). Зони, що утворюються при висушуванні та нагріванні, характеризуються різним перебігом процесів тепломасообміну.

У деревині до процесу висушування у процесі горіння вологість визначається межею насичення стінок клітин – $W_{\text{п.н.}}$. При досягненні деревини температури кипіння води (при $P = 0,1$ МПа, $t_{\text{кип}} = 100^\circ\text{C}$) випаровування вільної вологи переходить у кипіння. Пружність парів рідини досягає тиску навколишнього простору, що призводить до витіснення повітря та стабілізації температури $t \geq t_{\text{кип}}$. Подальше підвищення температури фази, що випаровується вище температури пароутворення неможливе до моменту перетворення всієї киплячої рідини в пар. Після періоду википання вільної вологи по всьому перерізу зони встановлюється вологість $W < W_{\text{п.н.}}$.

Таким чином, система рівнянь перенесення тепла та вологи у приватних похідних (2.11)–(2.12) з відомими початковими розподілами температури та вологості (2.13)–(2.14) при заданих граничних теплових умовах стандартної пожежі (2.14)–(2.15) та вологообміну (2.16)–(2.17) та з урахуванням зон з різними фізичними властивостями при фазових переходах, межа яких визначається умовами (2.18)–(2.21), дозволяє повністю

розрахувати поля температур та вологості до моменту займання деревини.

Аналітичні дослідження показали, що при дії температури на деревину до її займання в процесі початкової стадії пожежі може понижати межу вогнестійкості конструкцій.

Висновки

Одним із критеріїв межі вогнестійкості конструкцій є втрата або зміна несучої здатності. Сутність оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій полягає у визначенні часу горіння, після якого перетин конструкції зменшується до критичного значення. Внаслідок зменшення перерізу напруга збільшується і при досягненні межі міцності конструкція руйнується. Однак, як показали аналітичні

дослідження, бурхливе википання і пароутворення може призвести не тільки до ослаблення стінок клітин деревини, але й може призвести навіть до їх часткового руйнування. Як показали дослідження таке явище здатне змінити межу міцності до 10 % навіть не обвугленої, а тільки «підсушеної» деревини. Таку деревину на відміну від обвугленої назвемо «свіжою» деревиною. На основі проведених досліджень виникає необхідність при оцінці вогнестійкості або підвищенні вогнестійкості будівельних дерев'яних конструкцій визначати зміну міцності «свіжої» деревини в зоні де $t \geq t_{\text{крит}}$, так як ця зона матиме місце на всіх стадіях процесу горіння та просуватиметься до центру конструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Калафат К. В., Вахитова Л. Н. Каталог средств огнезащиты стальных конструкций. Метінвест, 2017. 91 с.
2. Пронин Д. Г. Огнестойкость стальных несущих конструкций. Аксиом графикс юнион, 2015. 52 с.
3. Вахитова Л. Н., Калафат К. В. Основы огнезащиты стальных конструкций. *Промислове виробництво та інженерні споруди*. 2015. № 2. С. 23–27.
4. ДСТУ Б В.1.1-4-98*. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Київ : Держбуд України, 2005. 19 с.
5. ДСТУ-Н-ПБВ.1.1-29:2010. Захист від пожежі. Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 9 с.
6. ДСТУ-НБ EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3: Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT). Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. 98 с.
7. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ : Мінрегіон України, 2016. 111 с.
8. Новак С. В., Добростан О. В., Долішній Ю. В., Ратушний О. В. Оцінювання збіжності результатів експериментального визначення тривалості вогневого впливу до досягнення критичної температури сталі. *Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. № 2 (4). С. 67–72.
9. ТУ У 24.3-13481691-011:2009. Суміші для вогнезахисних та теплоізолюючих покриттів марки «ТЕРМОДОН» (2004). Технічні умови. Донецький центр стандартизації, метрології та сертифікації, 2009. 18 с.

REFERENCES

1. Calafat K.V. and Vakhitova L.N. *Katalog sredstv ognezashchity stal'nykh konstruktсий* [Catalog of fire protection products for steel structures]. Metinvest Publ., 2017, 91 p. (in Russian).
2. Pronin D.G. *Ognestojkost' stal'nyh nesushchih konstruktсий* [Fire resistance of steel load-bearing structures]. Axiom grafiks yunion Publ., 2015, 52 p. (in Russian).
3. Vakhitova L.N. and Calafat K.V. *Osnovy ognezashchity stal'nyh konstruktсий* [Fundamentals of fire protection of steel structures]. *Promislove virobnictvo ta inzhenerni sporudi* [Industrial production and engineering facilities]. 2015, no. 2, pp. 23–27. (in Russian).
4. *DSTU B V.1.1-4-98*. Zakhyst vid pozhezhi. Budivelni konstruktсий. Metody vyprobuvan na vohnestistikist. Zahalni vymohy* [Fire protection. Building constructions. Test methods for firefighters. General requirement]. Kyiv : Derzhbud Ukrainy, 2005, 19 p. (in Ukrainian).
5. *DSTU-N-P B V.1.1-29:2010. Zakhyst vid pozhezhi. Vohnezakhysne obrobliannia budivelnnykh konstruktсий. Zahalni vymohy ta metody kontroliuvannia* [Fire protection. Fire-retardant treatment of building structures. General requirements and control methods]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011, 9 p. (in Ukrainian).

6. *DSTU-N B EN 1993-1-2:2010. Yevrokod 3: Proektuvannia stalevykhkonstruksii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstruksii na vohnestiikist* [Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-2. Terms. Calculation of structures for fire resistance] (EN 1993-1-2: 2005, IDT). Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2012, 98 p. (in Ukrainian).

7. *DSTU-N B B.2.6-211:2016. Proektuvannia stalevykh konstruksii. Rozrakhunok konstruksii na vohnestiikist* [Design of steel structures. Calculation of structures for fire resistance]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2016, 111 p. (in Ukrainian).

8. Novak S.V., Dobrostan O.V., Dolishniy Y.V. and Ratushny O.V. *Otsiniuvannia zbizhnosti rezultativ eksperymentalnoho vyznachennia tryvalosti vohnevoho vplyvu do dosiahnennia krytychnoi temperatury stali* [Evaluation of convergence of results of experimental determination of duration of fire influence before achievement of critical temperature of steel]. 2017, no. 2 (4), pp. 67–72. (in Ukrainian).

9. *TU U 24.3-13481691-011:2009.Sumishi dlia vohnezakhysnykh ta teploizoliuiuchykh pokryttiv marky "TERMODON" (2004). Tekhnichni umovy* [Mixtures for fire-retardant and heat-insulating coverings of the TERMODON brand. Specifications]. Donetsk Center for Standardization, Metrology and Certification, 18 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.12.2024.

УДК 519.6:331.45

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.57.1129

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗАХИСНИХ БАР'ЄРІВ НА ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ ЗАХВОРЮВАНЬ У ПРАЦІВНИКІВ

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

³ 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: v.kozachyna@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

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) 373-15-09, e-mail: gidro_eko@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-3057-9204

⁵ Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-43-63, e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

Анотація. Постановка проблеми. Викиди від автотранспорту створюють значні зони хімічного забруднення повітря біля автодоріг. Поблизу автомобільних доріг часто розташовуються торговельні павільйони. Таке розташування людей протягом робочого дня біля магістралі створює ризик захворювання працівників. Тому важливо знизити інтенсивність забруднення повітря. Найпростішим і найефективнішим способом захисту від забруднення атмосферного повітря поблизу автомобільних доріг є використання бар'єрів. Для обґрунтування параметрів захисного бар'єру потрібно мати спеціалізовані математичні моделі. **Мета роботи.** Розробка чисельних моделей для розрахунку рівня забруднення робочих зон біля автодоріг з метою визначення ефективності використання захисних бар'єрів для зниження ризику захворювань у працівників. **Методика.** Для математичного моделювання поширення домішки при наявності захисних бар'єрів використовуються двовимірні рівняння аеродинаміки та масопереносу. Розроблена чисельна модель дозволяє врахувати профіль швидкості повітряного потоку, атмосферну дифузію, інтенсивність емісії домішки, швидкість гравітаційного осадження домішки в повітрі. Для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь аеродинаміки та масопереносу використовуються кінцево-різницеві схеми розщеплення. **Наукова новизна.** Запропонована ефективна чисельна модель, що дозволяє визначати поле концентрації небезпечної речовини біля автотраси. Модель дозволяє аналізувати зони забруднення повітря з урахуванням впливу захисного бар'єру, що розташований біля автодороги. На базі даних про розподіл концентрації небезпечної речовини визначається ризик появи захворювань у людини, що знаходиться в зоні впливу викидів від автотранспорту. **Практична значущість.** Побудована модель може бути використана для експрес прогнозу рівня небезпеки для працівників, чия робоча зона розташовується біля автодороги. **Висновки.** Здійснена програмна реалізація розробленої чисельної моделі, проведений обчислювальний експеримент, що проілюстрував ефективність використання розробленої чисельної моделі для рішення прикладних задач.

Ключові слова: математичне моделювання; захисний бар'єр; викиди авто; ризик захворювань; забруднення повітря

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF PROTECTIVE BARRIERS ON REDUCING THE RISK OF ILLNESSES IN WORKERS

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

KOZACHYNA V.A.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
MASHYKHINA P.B.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
TYMOSHENKO O.A.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 Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydnipravska 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

³ 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: y.kozachyna@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁴ 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: gidro_eko@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-3057-9204

⁵ Department of Ecology and Environmental Protection, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydnipravska State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 452-43-63, e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

Abstract. Problem statement. Emissions from motor vehicles create significant areas of chemical air pollution near highways. Shopping malls are often located near highways. This arrangement of people during the working day near the highway creates a risk of workers becoming ill. Therefore, it is important to reduce the intensity of air pollution. The simplest and most effective way to protect against atmospheric air pollution near highways is to use barriers. To substantiate the parameters of the protective barrier, you need to have specialized mathematical models.

The purpose of the article. Development of numerical models to calculate the level of contamination of work areas near highways in order to determine the effectiveness of using protective barriers to reduce the risk of diseases in workers.

Methodology. For mathematical modeling of impurity propagation in the presence of protective barriers, two-dimensional equations of aerodynamics and mass transfer are used. The developed numerical model allows taking into account the air flow velocity profile, atmospheric diffusion, impurity emission intensity, and the rate of gravitational deposition of the impurity in the air. Finite-difference splitting schemes are used for numerical integration of the modeling equations of aerodynamics and mass transfer.

Scientific novelty. An effective numerical model is proposed that allows determining the field of concentration of a hazardous substance near a highway. The model allows analyzing air pollution zones taking into account the influence of a protective barrier located near the highway. Based on the data on the distribution of the concentration of a hazardous substance, the risk of developing diseases in a person located in the zone of influence of vehicle emissions is determined.

Practical significance. The constructed model can be used to quickly predict the level of danger for workers whose work area is located near the road. **Conclusions.** A software implementation of the developed numerical model was carried out, and a computational experiment was conducted, which illustrated the effectiveness of using the developed numerical model for solving applied problems.

Keywords: *mathematical modeling; protective barrier; car emissions; disease risk; air pollution*

Постановка проблеми. Відомо, що інтенсивне забруднення повітря відбувається поблизу автомобільних доріг. Викиди автомобілів містять значну кількість шкідливих речовин, небезпечних для здоров'я. Поблизу автомобільних доріг часто розташовуються торговельні павільйони. Таке розташування людей протягом робочого дня біля магістралі створює ризик захворювання працівників. Тому важливо знизити інтенсивність забруднення повітря. Найпростішим і найефективнішим способом захисту від забруднення атмосферного повітря поблизу автомобільних доріг є використання бар'єрів (рис. 1) [1–5; 7]. Для оцінки ефективності бар'єрів широко

використовуються експериментальні методи (рис. 2, 3). Але використання таких методів дослідження є трудомістким і дорогим.



Рис. 1. Захисний бар'єр біля автотраси [2]

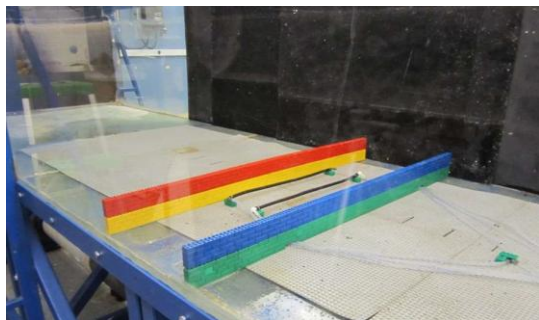


Рис. 2. Розташування моделі захисних бар'єрів в лабораторії [2]



Рис. 3. Експериментальне дослідження зон забруднення з використанням бар'єру Т-форми: 1 – місце емісії CO; 2 – область забруднення під пластиною; 3 – область забруднення над пластиною [3]

Для практики важливо мати обчислювальні методи, які дозволяють швидко визначити ефективність бар'єрів для конкретних умов. До таких методів належать, серед інших, модель Гауса [2], різні CFD моделі (рис. 4) [2; 4].

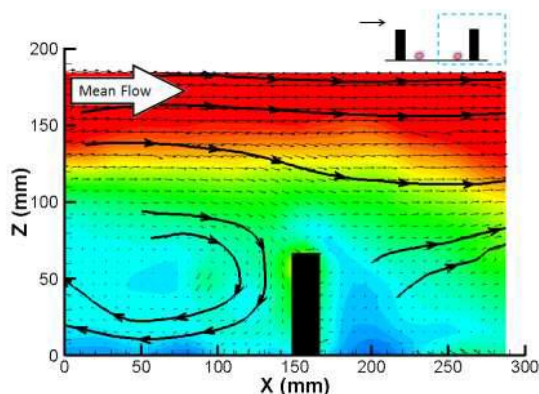


Рис. 4. CFD моделювання зони забруднення біля бар'єру [2]

Для практики також важливо мати швидкі обчислювальні моделі для оцінки ефективності бар'єрів для конкретних умов. Нижче розглядається така модель CFD для аналізу інтенсивності зон забруднення поблизу автомагістралі та оцінки

ефективності використання бар'єрів різної форми для зменшення інтенсивності забруднення повітря біля павільйонів.

Мета статті – розробка чисельних моделей для розрахунку рівня забруднення робочих зон біля автодоріг з метою визначення ефективності використання захисних бар'єрів для зниження ризику захворювань у працівників.

Методика. У цій статті розглядалося забруднення CO біля дороги з бар'єром. Для розрахунку зон забруднення повітря (викиди продуктів згоряння) використовували рівняння масопереносу [3; 5; 6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (1)$$

де C – концентрація CO в повітрі, u, v – складові вектора швидкості вітру, x_i, y_i – декартові координати джерела викидів, t – час, μ_x, μ_y – коефіцієнти турбулентної дифузії в атмосфері, $\delta(x_i, y_i)$ – дельта-функція Дірака, Q – інтенсивність викидів CO. Коефіцієнти турбулентної дифузії в атмосфері були визначені наступним чином:

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

Граничні умови для (1) були такими:

1. На межі входу повітряного потоку: $C = 0$.
2. На межі витоку потоку з розрахункової області: $\partial C / \partial n = 0$.
3. На твердих межах і на поверхнях $y = 0, y = L_y$ (L_y – верхня межа області): $\partial C / \partial n = 0$, де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні.

Для часу $t = 0$ початкова умова була $C = 0$.

Чисельне інтегрування рівняння масообміну (1) проводилось з використанням різницевих схем та прямокутної сітки. Для формування геометричного вигляду розрахункової області (форма бар'єру, його положення, положення павільйону тощо) використовувалися маркери [6].

Спочатку (1) було виконаємо розщеплення різницевого рівняння (1) таким

чином :

- на *першому кроці* розщеплення $k = \frac{1}{4}$ різницеве рівняння має вигляд :

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^n + \\ + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l ; \end{aligned} \quad (2)$$

- на *другому кроці* розщеплення $k = n + \frac{1}{2}$, $c = n + \frac{1}{4}$ різницеве рівняння має вигляд :

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + \\ + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l ; \end{aligned} \quad (3)$$

- на *третьому кроці* розщеплення $k = n + \frac{3}{4}$, $c = n + \frac{1}{2}$ різницеве рівняння має вигляд :

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + \\ + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l ; \end{aligned} \quad (4)$$

- на *четвертому кроці* розщеплення $k = n + 1$, $c = n + \frac{3}{4}$ різницеве рівняння має вигляд :

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + \\ + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l ; \end{aligned} \quad (5)$$

Значення різницевих операторів $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-$ наведені в [6].

З рівнянь (2) – (5) невідоме значення

концентрації пилу на верхньому часовому шарі визначається за явною формулою біжучого рахунку. Початкова умова для цих рівнянь записується у вигляді :

$$C^1| = C(x, y, t^n), C^k| = C^{k-1}|.$$

Щоб реалізувати граничну умову на твердих стінках вигляду :

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

застосовуються фіктивні комірки.

Бар'єр, павільйон (споруда) впливають на характер вітрового потоку біля дороги. Для розрахунку поля швидкостей використовувалася модель потенційного потоку. У цьому випадку основним рівнянням було рівняння Лапласу:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (6)$$

де P – потенціал швидкості.

Граничні умови для (4) розглянуті в [6]. На межі притоку потоку в розрахункову область використовувався наступний профіль швидкості вітру :

$$u(y) = u_1 \cdot (y/y_1)^{n_1},$$

де u_1 – швидкість вітру на висоті $y_1 = 1$ м.

Складові швидкості вітру визначали наступним чином:

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

Для чисельного інтегрування (6) його записали у вигляді :

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (7)$$

де t – фіктивний час. При $t \rightarrow \infty$ розв'язок (7) буде прагнути до «сталого» розв'язку, тобто до розв'язку (6).

На наступному кроці здійснюється геометричне розщеплення рівняння (7) таким чином :

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \quad (9)$$

Далі для визначення невідомого значення P на базі рівняння (8) використовується така залежність :

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

Для визначення невідомого значення P на базі рівняння (9) застосовується залежність :

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

Обчислення закінчуються, коли виконувалася наступна умова :

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

де ε – мале число ($\varepsilon = 0,001$), n – номер ітерації.

Після розрахунку поля потенціалу швидкості розраховували складові вектора швидкості повітряного потоку за залежностями :

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

Для оцінки ефективності бар'єру використовувався наступний параметр :

$$HQ = \frac{C_R}{R_{fc}},$$

де HQ – показник ризику потенційної небезпеки (Hazard Quotient); C_R – концентрація СО в точці розташування рецептора; R_{fc} – референтна концентрація ($R_{fc} = 3 \text{ мг/м}^3$). Якщо $HQ \ll 1$, це означає, що ризик для здоров'я мінімальний.

Для кодування розробленої чисельної моделі використовувався FORTRAN.

Результати. Розроблена чисельна модель була використана для розрахунку зон забруднення при викидах СО з дороги із

захисним бар'єром, що мав складну форму. Було розглянуто чотири сценарії: сценарій № 1 – відсутність захисного бар'єру (рис. 4); сценарій № 2 – вертикальний Г-подібний бар'єр, $H = 2,5$ м, довжина горизонтального елемента 1 м (рис. 5); сценарій № 3 – Г-подібний бар'єр, $H = 5$ м, довжина горизонтального елемента 1 м (рис. 6); сценарій № 4 – бар'єр с додатковим елементом, що має складну форму (рис. 7).

Вихідні дані були такими : $u_1 = 5,3$ м/с; висота павільйону 5 м; бар'єр знаходився в 7 м від павільйону; розміри розрахункової області $25 \text{ м} \times 12,5 \text{ м}$; Швидкість викиду СО складала 17 мг/с. Точка «інтересу» (рецептор) знаходилася біля стіни павільйону на висоті 1,7 м (рис. 4, а). Результати чисельного експерименту (зони забруднення) показані на рисунках нижче. Кожне число на цих малюнках показує концентрацію забруднювача у відсотках від максимальної концентрації C_{max} .

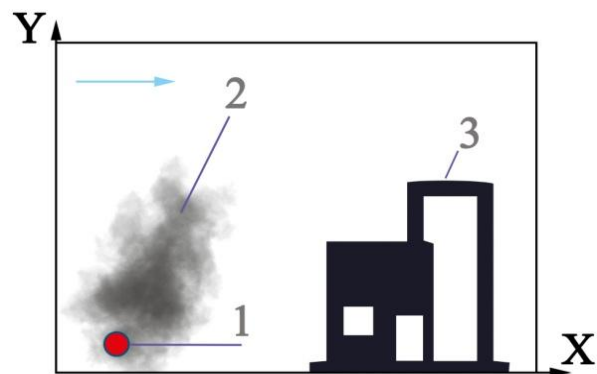


Рис. 5. Схема розрахункової області (сценарій № 1, нема бар'єру)

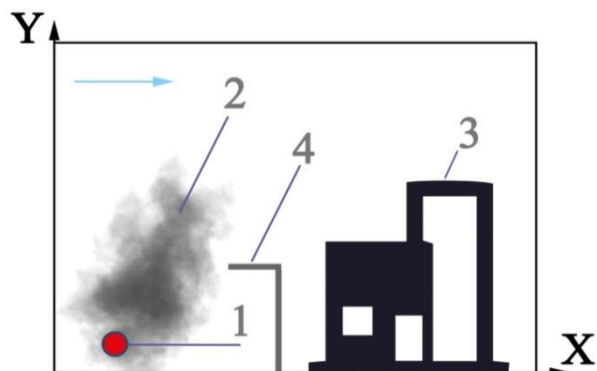


Рис. 6. Схема розрахункової області (сценарій № 2, висота бар'єру $H = 2.5$ м)

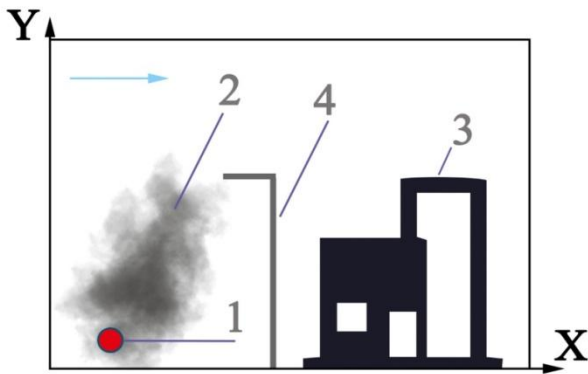


Рис. 7. Схема розрахункової області (сценарій № 3, висота бар'єру $H = 5$ м)

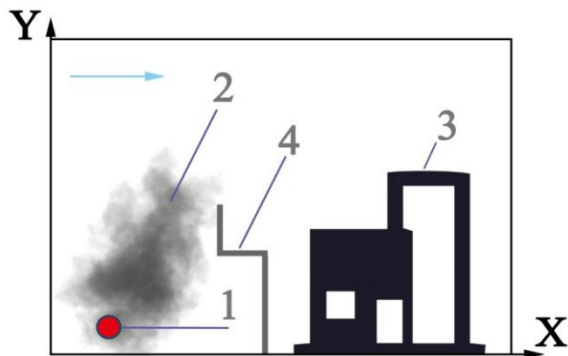


Рис. 8. Схема розрахункової області (сценарій № 4, бар'єр с додатковим елементом)

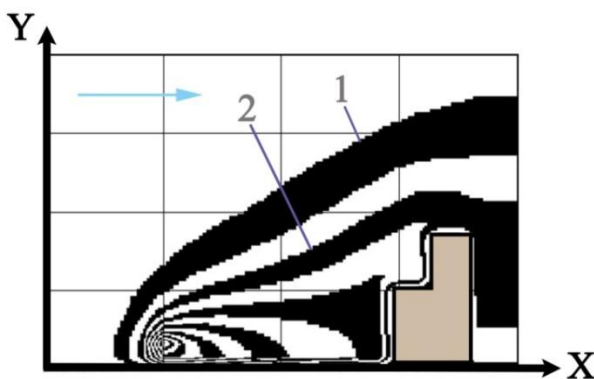


Рис. 9. Схема розрахункової області (сценарій № 1, нема бар'єру). Ізолінії концентрації CO (сценарій № 1): 1 – $C = 0.24$ мг/м³; 2 – $C = 0.56$ мг/м³

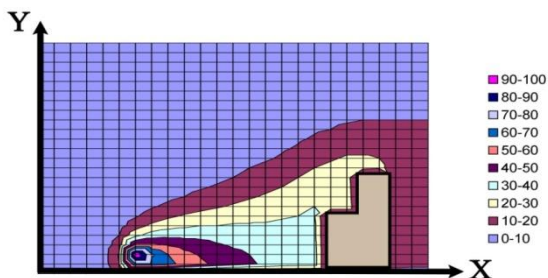


Рис. 10. Поле концентрації CO, сценарій № 2, $C_{max} = 2.41$ мг/м³

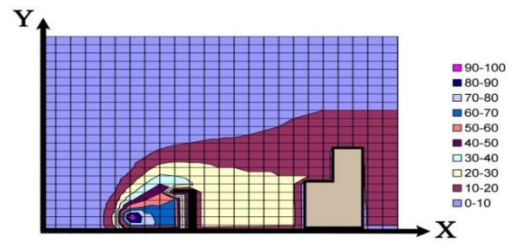


Рис. 11. Поле концентрації CO, сценарій № 3, $C_{max} = 2.88$ мг/м³

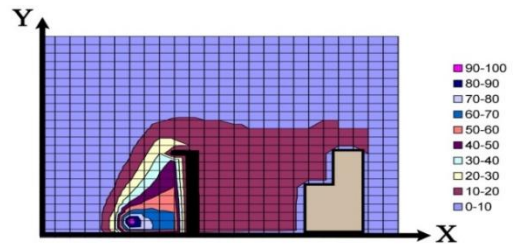


Рис. 12. Поле концентрації CO, сценарій № 3, $C_{max} = 3.29$ мг/м³

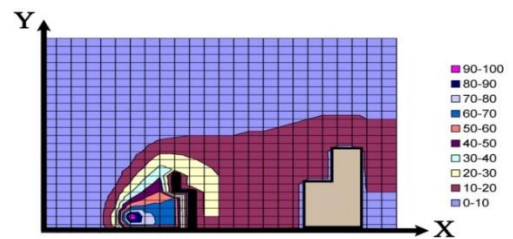


Рис. 13. Поле концентрації CO, сценарій № 4, $C_{max} = 3.12$ мг/м³

Дані, що наведені на рисунках 9–13 показують, що бар'єри викликають деформацію зони забруднення біля дороги. Найбільш забруднена зона утворилася між автомобілем (джерелом викидів) та бар'єром через «гальмування» вітрового потоку в цій області.

У таблиці 1 наведено показник ризику потенційної небезпеки для рецептора (людина біля павільйона).

Таблиця 1

Показник ризику потенційної небезпеки HQ (Hazard Quotient)

Сценарій	HQ
Сценарій № 1	0,27
Сценарій № 2	0,21
Сценарій № 3	0,14
Сценарій № 4	0,18

Дані таблиці 1 показують, що найбільш ефективним є 3-й сценарій, тобто використання бар'єру, що має висоту $H = 5$ м.

Також видно, що якщо використовувати бар'єр $H = 2,5$ м але з додатковим елементом (сценарій № 4), то це дозволяє досягти також непоганий результат.

Варто відзначити, що час обчислення становив 2 секунди для кожного сценарію.

Наукова новизна та практична цінність. Запропонована ефективна чисельна модель, що дозволяє визначити поле концентрації небезпечної речовини біля автотраси. Модель дозволяє аналізувати зони забруднення повітря з урахуванням впливу захисного бар'єру, що розташований біля автодороги. На базі даних про розподіл концентрації небезпечної речовини визначається ризик появи захворювань у людини, що знаходиться в зоні впливу викидів від автотранспорту.

Побудована модель може бути

використана для експрес прогнозу рівня небезпеки для працівників, чия робоча зона розташовується біля автодороги.

Висновки

1. Змодельовано вплив бар'єрів на забруднення повітря біля доріг. Для цього була розроблена модель CFD. Розроблена CFD-модель споживає небагато обчислювального часу завдяки застосуванню моделі потенційного потоку для імітації картини вітрового потоку в регіоні, який мав комплексну геометричну форму.

2. Результати чисельного експерименту показують, що вертикальний бар'єр, який має висоту $H = 5$ м, дозволяє зменшити концентрацію забруднюючих речовин біля павільйону, який встановлено біля дороги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Schulte N., Venkatram A. Effects of Sound Barriers on Dispersion from Roadways. DRAFT Final Report. USA : Bourns College of Engineering, 2013. 100 p.
2. Princevac M. Near Field Effects of Sound Barriers on Flow and Dispersion. USA : AQMD, 2013. 95 p.
3. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Якубовська З. М. Дослідження ефективності захисних екранів різної форми на зниження забруднення повітря. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 4 (016). С. 27–33. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.290823.27.967
4. Maruntalu O., Lazaroiu G., Bondrea D. Variations in the atmospheric pollutant immission (2009–2015) field near a large lignite-fired power plant (in Europe/Poland). *U.P.B. Sci. Bull.* 2015. Ser. D 77 (4). Pp. 229–236.
5. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Computer Model for Simulation of Pollutant Dispersion Near the Road with Solid Barriers. *Transp. Probl.* 2021. № 16 (2). Pp. 73–86.
6. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.
7. Biliaiev M., Berlov O., Biliaieva V., Kozachyna V. A., Kozachyna V. V., Yakubovska Z. Modeling Influence of TiO₂ Barrier Coating on Pollutant Dispersion Near Road. *27th International Scientific Conference Transport Means-2023 : Proceedings of the International Conference*. P. 1, vol. 4–6. October, 2023. Pp. 511–517. ISSN 1822296X.

REFERENCES

1. Schulte N. and Venkatram A. Effects of Sound Barriers on Dispersion from Roadways. DRAFT Final Report. USA : Bourns College of Engineering, 2013, 100 p.
2. Princevac M. Near Field Effects of Sound Barriers on Flow and Dispersion. USA : AQMD, 2013, 95 p.
3. Biliaiev M.M., Berlov O.V., Biliaieva V.V., Kozachyna V.A. and Yakubovska Z. M. *Doslidzhennya efektyvnosti zahysnykh ekraniv riznoyi formy na znyzhennya zabrudnennya povitrya* [Research into the effectiveness of protective screens of various shapes in reducing air pollution]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 4 (016), pp. 27–33. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.290823.27.967 (in Ukrainian).
4. Maruntalu O., Lazaroiu G. and Bondrea D. Variations in the atmospheric pollutant immission (2009–2015) field near a large lignite-fired power plant (in Europe/Poland) *U.P.B. Sci. Bull.*, 2015, Ser. D 77 (4), pp. 229–236.
5. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V. and Sladkowski A. Computer Model for Simulation of Pollutant Dispersion Near the Road with Solid Barriers. *Transp. Probl.* 2021, no. 16 (2), pp. 73–86.
6. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khutch V.K. and Biliaiev M.M. *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushey srede* [Numerical simulation of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).
7. Biliaiev M., Berlov O., Biliaieva V., Kozachyna V.A., Kozachyna V.V. and Yakubovska Z. Modeling Influence of TiO₂ Barrier Coating on Pollutant Dispersion Near Road. *27th International Scientific Conference Transport Means-2023 : Proceedings of the International Conference*. P. 1, vol. 4–6, October, 2023, pp. 511–517. ISSN 1822296X.

Надійшла до редакції: 12.12.2024.

УДК 697. 644.1

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.64.1130

МЕТОД ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКА ІНФІЛЬТРАЦІЇ

БОНДАРЕНКО А. В.^{1*}, *здоб.*,

ЮРЧЕНКО Є. Л.², *канд. техн. наук, доц.*

^{1*} Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: bondarenkoandrey177@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4531-2556

² Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: yel@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9356-3261

Анотація. Стаття створена на основі результатів інструментального дослідження параметрів мікроклімату, таких як температури, вологості повітря та концентрації вуглекислого газу CO₂ у приміщеннях бомбосховища та укриття. Результати статті отримані в рамках проведення проекту 101082898 — UKRENERGY «Innovative Master Courses Supporting the Improvement of the Energy and Carbon Footprint of the Ukrainian Building Stock» / «Інноваційні магістерські програми щодо енергоефективності та зменшення вуглецевого сліду в будівельному фонді України» (Тема: ERASMUS-EDU-2022-CBHE-STRAND-2) передбачає створення нових магістерських програм на тему «Енергоефективність, модернізація будівель та енергетичне планування» в українських університетах та просування передового досвіду ЄС щодо освітніх методологій та конкретних знань, пов'язаних з енергоефективністю та стійкістю будівель, зокрема впровадження інноваційних магістерських курсів щодо енергоефективності та зменшення вуглецевого сліду в будівельному фонді України [1]. У даній статті виведено графічну залежність основних параметрів мікроклімату таких як температура, вологості повітря та концентрації вуглекислого газу CO₂ від різних режимів експлуатації будівлі. Було проведено інструментальний моніторинг параметрів мікроклімату бомбосховища та укриття за допомогою логера HT-2000. Протягом 5 годин було промоніторено параметри температури, відносної вологості та рівня вуглекислого газу, у різних режимах експлуатації, тобто в залежності від кількості людей що знаходились у приміщенні та в залежності від режиму відкривання зовнішніх дверей. Логер HT-2000 протягом дослідження знаходився у приміщенні бомбосховища та укриття на висоті 1,2 м від підлоги [2]. На обох об'єктах при перебуванні у досліджуваному приміщенні великої кількості людей було зафіксоване значне зростання показника CO₂. Коли люди покинули досліджуване приміщення логер продовжував фіксувати значення параметрів температури, вологості повітря та концентрацію CO₂ протягом двох годин. За цей період у приміщенні не перебувало жодної людини, показник CO₂ та температури стабільно зменшувалась. рівень вуглекислого газу у бомбосховищі знизився із позначки 1 100 ppm до 550 ppm за 120 хв. В укритті знизився із позначки 1 385 ppm до 819 ppm за 120 хв. За цей ж період температура у обох випадках знижувалась, у бомбосховищі з 10 до 8 °C, в укритті з 14 до 11 °C. За даними показниками було побудовано графік залежності параметрів температури, відносної вологості та рівня вуглекислого газу в залежності від різних режимів експлуатації. На графіку виділено два значення CO₂ на початку та наприкінці періоду зниження значення концентрації CO₂ за проміжок часу у 120 хвилин. За функцією від різниці значень показників ΔCO₂ за проміжок часу t можемо розрахувати площу фігури утворену двома точками значень концентрації ΔCO₂. За отриманим значенням площі фігури можна дати відносну якісну оцінку показника інфільтрації будівлі [3]. Таким чином було отримано спрощений інструментальний метод якісної оцінки параметра інфільтрації. Наступним кроком є отримання не тільки якісної але і кількісної оцінки параметра інфільтрації за допомогою інструментального методу визначення концентрації CO₂, температури та вологості повітря.

Ключові слова: *інфільтрація; температура повітря; енергоефективність; CO₂; параметри мікроклімату; кратність повітрообміну; повітропроникність*

METHOD OF INSTRUMENTAL ASSESSMENT OF THE INFILTRATION INDICATOR

BONDARENKO A.V.^{1*}, *External Cand.*,

YURCHENKO Yevh.L.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. 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, e-mail: bondarenkoandrey177@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4531-2556

² 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: yel@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9356-3261

Abstract. This article was developed based on the results of an instrumental study of microclimate parameters such as: temperature, air humidity, and CO₂ carbon dioxide concentration in bomb shelters and shelters. The results of the article were obtained within the framework of the project 101082898 — UKRENERGY “Innovative Master Courses Supporting the Improvement of the Energy and Carbon Footprint of the Ukrainian Building Stock” EDU-2022-CBHE-STRAND-2) envisages the creation of new master's programs on the topic “Energy efficiency, modernization of buildings and energy planning” in Ukrainian universities and the promotion of best practices of the EU regarding educational methodologies and specific knowledge related to energy efficiency and sustainability of buildings, in particular, the introduction of innovative master's courses on energy efficiency and reducing the carbon footprint in the building stock of Ukraine [1]. This article shows the graphical dependence of the main parameters of the microclimate, such as temperature, air humidity, and the concentration of CO₂ carbon dioxide, on various modes of operation of the building. Instrumental monitoring of the microclimate parameters of the bomb shelter and shelter was carried out using the NT-2000 logger. During 5 hours, parameters of temperature, relative humidity and level of carbon dioxide were monitored in different modes of operation, i.e. depending on the number of people in the room and depending on the mode of opening the external doors. During the study, the NT-2000 logger was located in the bomb shelter and shelter at a height of 1,2 m from the floor [2]. At both facilities, when a large number of people were in the research room, a significant increase in the CO₂ index was recorded. When people left the research room, the logger continued to record the values of temperature, air humidity and CO₂ concentration for two hours. During this period, not a single person was in the room, CO₂ and temperature decreased steadily. the level of carbon dioxide in the bomb shelter dropped from 1 100 ppm to 550 ppm in 120 minutes. In the shelter, it dropped from 1 385 ppm to 819 ppm in 120 minutes. During the same period, the temperature in both cases decreased, in the bomb shelter from 10 to 8 °C, in the shelter from 14 to 11 °C. According to these indicators, a graph of the dependence of the parameters of temperature, relative humidity and carbon dioxide level depending on different modes of operation was constructed. The graph shows two values of CO₂ at the beginning and at the end of the period of decrease in CO₂ concentration over a period of 120 minutes. We can calculate the area of the figure formed by two points of the ΔCO_2 concentration values as a function of the difference in the values of the ΔCO_2 indicators during the time interval t . Based on the obtained value of the area of the figure, it is possible to give a relative qualitative assessment of the infiltration rate of the building [3]. In this way, a simplified instrumental method of qualitative assessment of the infiltration parameter was obtained. The next step is to obtain not only a qualitative but also a quantitative assessment of the infiltration parameter using an instrumental method of determining CO₂ concentration, temperature and air humidity.

Keywords: *infiltration; air temperature; energy efficiency; CO₂; microclimate parameters; air exchange rate; air permeability*

Вступ. У статті описано метод за яким можна дати якісну оцінку параметру інфільтрації та герметичності зовнішньої оболонки будівлі. Після досягнення максимального значення CO₂ у приміщенні протягом декількох годин фіксується падіння значення CO₂. Чим нижчим стане показник CO₂, тим будівля менш герметична. Таким спрощеним методом можна дати якісну оцінку герметичності будівель із невеликим опалювальним об'ємом до 1 500 м³. Для будівель із великим опалювальним об'ємом рекомендовано проводити тест повітропроникності [4].

Актуальність дослідження. Якісна оцінка показника інфільтрації за

результатами інструментального обстеження параметрів концентрації CO₂ та температури надає змогу оцінити рівень герметичності зовнішніх огорожувальних конструкцій невеликих об'єктів не використовуючи обладнання для визначення повітропроникності будівель, яке має високу вартість та потребує кваліфікованих спеціалістів, а лише за допомогою приладу для визначення параметрів мікроклімату будівлі.

Останні дослідження та публікації. У статті [5] приведено порівняльний аналіз параметрів мікроклімату таких як температура, відносна вологість повітря, концентрація CO₂, у житлових малоповерхових будинків з різними

системами опалення. Визначено як різні системи опалення впливає на параметри мікроклімату будівель.

У статті [6] удосконалено методичні основи визначення повітропроникності будівель.

У статті [7] науково обґрунтовано використання параметру q_{50} (повітропроникність) для визначення класу енергоефективності будівель замість параметру n_{50} (кратність повітрообміну).

Дана стаття пропонує інструментальний механізм якісної оцінки показника інфільтрації.

Мета. Отримання інструментального механізму якісної оцінки показника інфільтрації будівлі.

Основна частина. Одним із об'єктів дослідження було бомбосховище у м. Дніпро. Стеля сховища розташована нижче рівня землі на 30 см. Із головного входу у під'їзд зліва знаходяться двері та сходові клітина яка веде униз до входу до сховища із герметичними дверями. Площа сховища – 84 м². Бомбосховище розраховано на 100 людей, у сховищі передбачено два приміщення для перебування людей, площами близько 20 м². Також передбачено санвузол на дві кабіни та умивальна, дві комори, два резервуари з водою. Бомбосховище має 3 виходи, які виходять на 2 різні фасади будівлі і облаштовані герметичними дверями. Зовнішні конструкції сховища товщиною 640 мм, із залізобетону та каменю. Підлога – бетонна плита 300 мм по ґрунту. Перекриття – плити керамзитобетонні. Висота стелі укриття 2,25 м. Габаритні розміри 14x7 м. У сховищі відсутні вікна. Проведено електрика, каналізація та водопостачання. Сховище не опалюється, некондиціонований об'єм сховища 189 м³. Площа зовнішніх огорожувальних конструкцій 105 м².

Другим об'єктом дослідження було укриття у м. Дніпро. Сховище знаходиться вище відмітки землі на 60 см. Із головного входу у під'їзд зліва знаходяться двері та сходові клітина яка веде униз до входу до укриття. На відміну від першого об'єкту

сховища, в укритті відсутні герметичні двері, є тільки один вихід із укриття, фактично укриття представляє собою звичайний підвал, не пристосований для перебування людей. Відсутня вентиляція, високий рівень запиленості, відсутність простору для розміщення більше 25 людей. Площа сховища – 61 м². Не передбачено санвузлів, комори, резервуарів із водою. Зовнішні конструкції сховища товщиною 640 мм, із каміння та бетону та внутрішні цегляні стіни. Підлога – бетонна плита 300 мм по ґрунту. Перекриття – плити керамзитобетонні. Висота стелі укриття 2,38 м. Габаритні розміри 10x8 м. У сховищі відсутні вікна. Проведено електрика для освітлення. Розетки відсутні. На момент проведення тесту електрика у приміщенні була відсутня. Сховище не опалюється, некондиціонований об'єм сховища 145 м³. Площа зовнішніх огорожувальних конструкцій 92 м².

Було проведено інструментальний аудит параметрів мікроклімату, таких як температура, відносна вологість, рівень CO₂ у бомбосховищі та укритті. Протягом п'яти годин було промоніторено параметри мікроклімату за допомогою логера НТ-2000 та програмного забезпечення, при різних режимах експлуатації.

Температура на вулиці на початку тесту 10 °С, відносна вологість – 55 %, рівень CO₂ – 710 ppm.

Регламент проведення інструментального аудиту параметрів мікроклімату у бомбосховищі. На момент проведення тесту опалення у будівлі було вимкнено.

Логер починає фіксувати значення о 10:30, обидві двері були зачинені, у приміщенні знаходилась одна людина. Перші значення CO₂ – 818 ppm, відносна вологість – 50,1 %, температура повітря – 15,1 °С.

Рівень вуглекислого газу починає зростати, і за 38 хвилин досягає відмітки 1105 ppm. (рис. 1, точка 1-2).

Температура починає падати і за 38 хвилин досягає 14,4 °С. (рис. 1, точка

1-2). Падіння температури визвано також падінням температури ззовні.

Відносна вологість повітря починає падати і за 38 хвилин досягає 38,8 % (рис. 1, точка 1-2).

Через 38 хвилин об 11:08 було відкрито герметичні двері, у приміщенні бомбосховища знаходилась одна людина.

Значення концентрації CO₂ продовжує зростати до 11:35 і досягає відмітки 1 230 ppm, після чого за 15 хвилин починає різко падати до 810 ppm (рис. 1, точка 2-3-4).

Температура продовжує падати і за 37 хв. досягає 7,2 °C (рис. 1, точка 2-3-4).

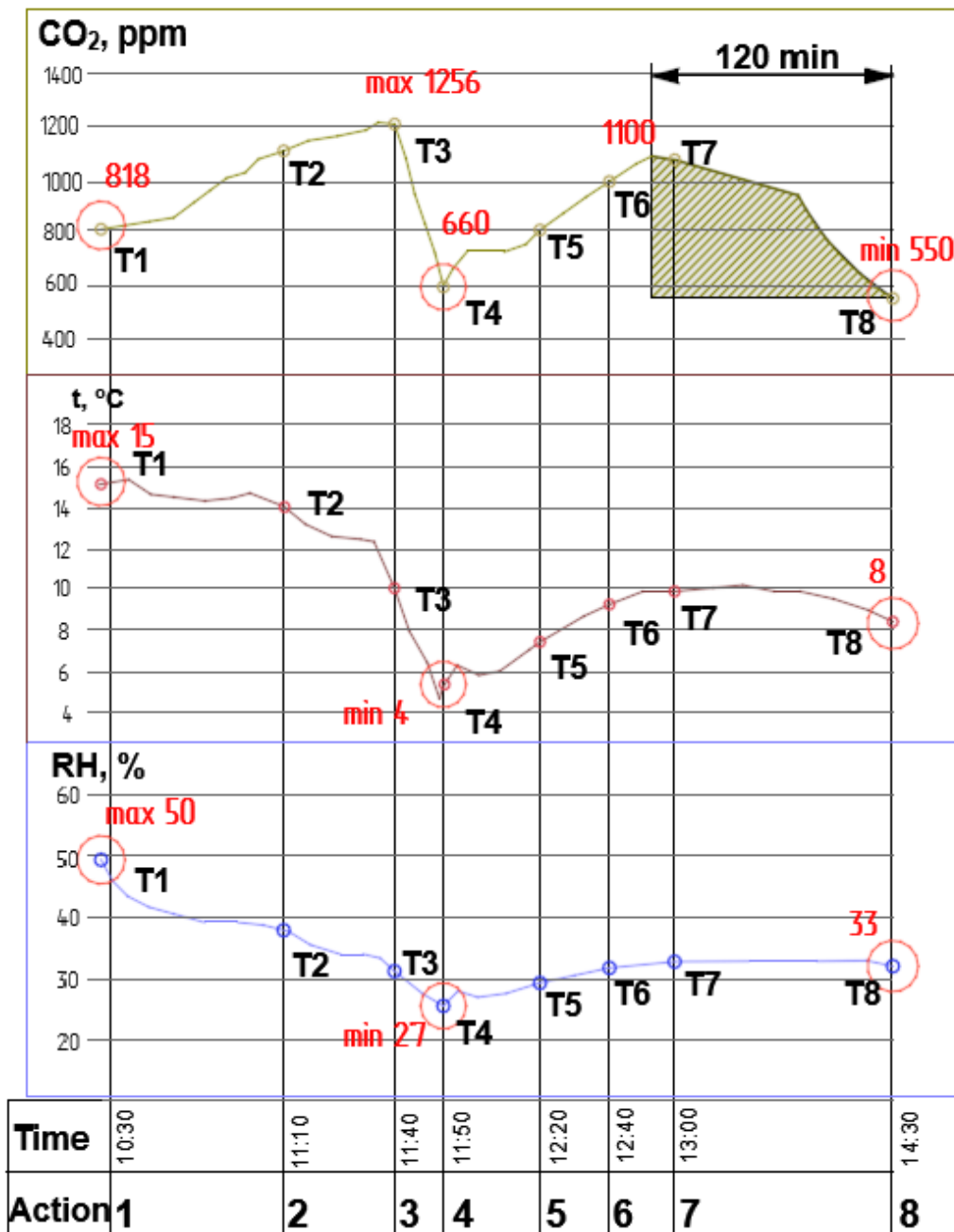


Рис. 1. Графік зміни параметрів концентрації CO₂, температури t, °C та відносної вологості повітря RH, % залежно від режимів експлуатації. Бомбосховище

Падіння температури визвано також падінням температури на вулиці.

Відносна вологість повітря продовжує падати і за 37 хв. досягає 27,3 % (рис. 1,

точка 2-3-4). Відмічається досить низький показник вологості та температури.

Через 37 хвилин об 11:45 було відкрито обидві герметичні двері, одна людина знаходилась у приміщенні бомбосховища.

Значення концентрації CO₂ продовжує зростати і піднімається із відмітки 605 ppm до 781 ppm о 12:20 (рис. 1, точка 4-5). Температура тримається майже однакова 7–8 °C (рис. 1, точка 4-5).

Відносна вологість повітря трохи зростає і досягає 30,0 % (рис. 1, 4-5).

О 12:20 закрито усі двері, у приміщення бомбосховища зайшло 4 людини.

Значення концентрації CO₂ зростає за період у 20 хв. з 800 ppm до відмітки 1 100 ppm (рис. 1, точка 5-6).

Температура зростає за період протягом 20 хв. з 7,5 до 10 °C (рис. 1, точка 5-6).

Відносна вологість повітря знижується без значних змін (рис. 1, точка 5-6).

О 12:40 усі люди покинули приміщення бомбосховища.

Значення концентрації CO₂ починає зменшуватися (рис. 1, точка 6-7). Температура повільно зменшується (рис. 1, точка 6-7).

Відносна вологість повітря трохи зростає (рис. 1, точка 6-7).

Протягом двох годин спостерігається зменшення значення концентрації CO₂, з 12:40 до 14:40.

Значення концентрації CO₂ поступово зменшується. За дві години з 12:40 до 14:40 показник падає із позначки 1 100 ppm до позначки 550 ppm о 14:40 (рис. 1, точка 6-7-8). Температура знижується з 10 до 8 °C (рис. 1, точка 6-7-8).

Відносна вологість повітря 30,0 % (рис. 1, 6-7-8).

Закінчення тесту відбулось о 14:40.

Наприкінці тесту температура повітря ззовні опустилась з 10 до 9 °C.

Регламент проведення інструментального аудиту параметрів мікроклімату в укрітті. На момент проведення тесту опалення у будівлі було вимкнено.

Температура на зовні на початку тесту – 11 °C, відносна вологість – 60 %, рівень CO₂ – 770 ppm.

Логер починає фіксувати значення о 9:10, усі двері зачинені, у приміщенні укріття знаходилась одна людина. Перші значення CO₂ – 750 ppm, відносна вологість – 42,1%, температура повітря – 9,4 °C.

Значення концентрації CO₂ починає зростати, і за 40 хв. досягає відмітки 850 ppm (рис. 2, точка 1-2).

Температура повітря за 40 хв. тримається на позначці 10,1 °C (рис. 2, точка 1-2).

Відносна вологість повітря за 40 хв. тримається на позначці 42,2 % (рис. 2, точка 1-2).

Через 40 хв. о 9:50 відкрито двері в укріття та двері у підїзд, одна людина у приміщенні.

Значення концентрації CO₂ знижується з 850 до 796 ppm об 11:00 внаслідок потрапляння повітря з вулиці (рис. 2, точка 2-3).

Температура продовжує падати і за 37 хв. досягає 7,2 °C (рис. 2, точка 2-3). Падіння температури визвано також падінням температури на вулиці.

Відносна вологість повітря продовжує падати і за 37 хв. досягає 27,3 % (рис. 2, точка 2-3). Відмічається дуже низький показник вологості та температури.

Об 11:00 було закрито двері, в укріття зайшли 4 людини, які перебували в укрітті 1 годину.

Значення концентрації CO₂ зростає із відмітки 796 до 1 385 ppm о 12:00 (рис. 2, точка 3-4). Температура піднімається з 11 °C до значення 14 °C (рис. 2, точка 3-4).

Відносна вологість повітря знижується зі значення 46 до 42,0 % (рис. 2, 3-4).

О 13:00 усі люди покинули приміщення укріття.

Значення концентрації CO₂ знижується за період з 12:00 по 13:50 з 1385 до відмітки 819 ppm о 13:50 (рис. 2, точка 4-5-6).

Температура зростає за період у 20 хв. з 7,5 до 10 °C (рис. 2, точка 4-5-6).

Відносна вологість повітря знижується без значних змін (рис. 2, точка 4-5-6).

Закінчення тесту відбулося о 13:50.

На обох об'єктах було зафіксовано підвищення концентрації CO₂ протягом

перебування людей у приміщенні. Після того як люди покинули приміщення і зовнішні двері були зачинені, логер знаходився у приміщенні 110–120 хв. і фіксував зниження значення концентрації

CO₂. Рівень вуглекислого газу знижувався у бомбосховищі на 550 ppm (з 1 100 до 550 ppm) за 120 хв. В укритті на 566 ppm (з 1 385 до 819 ppm) за 110 хв., 585 ppm за 120 хв.

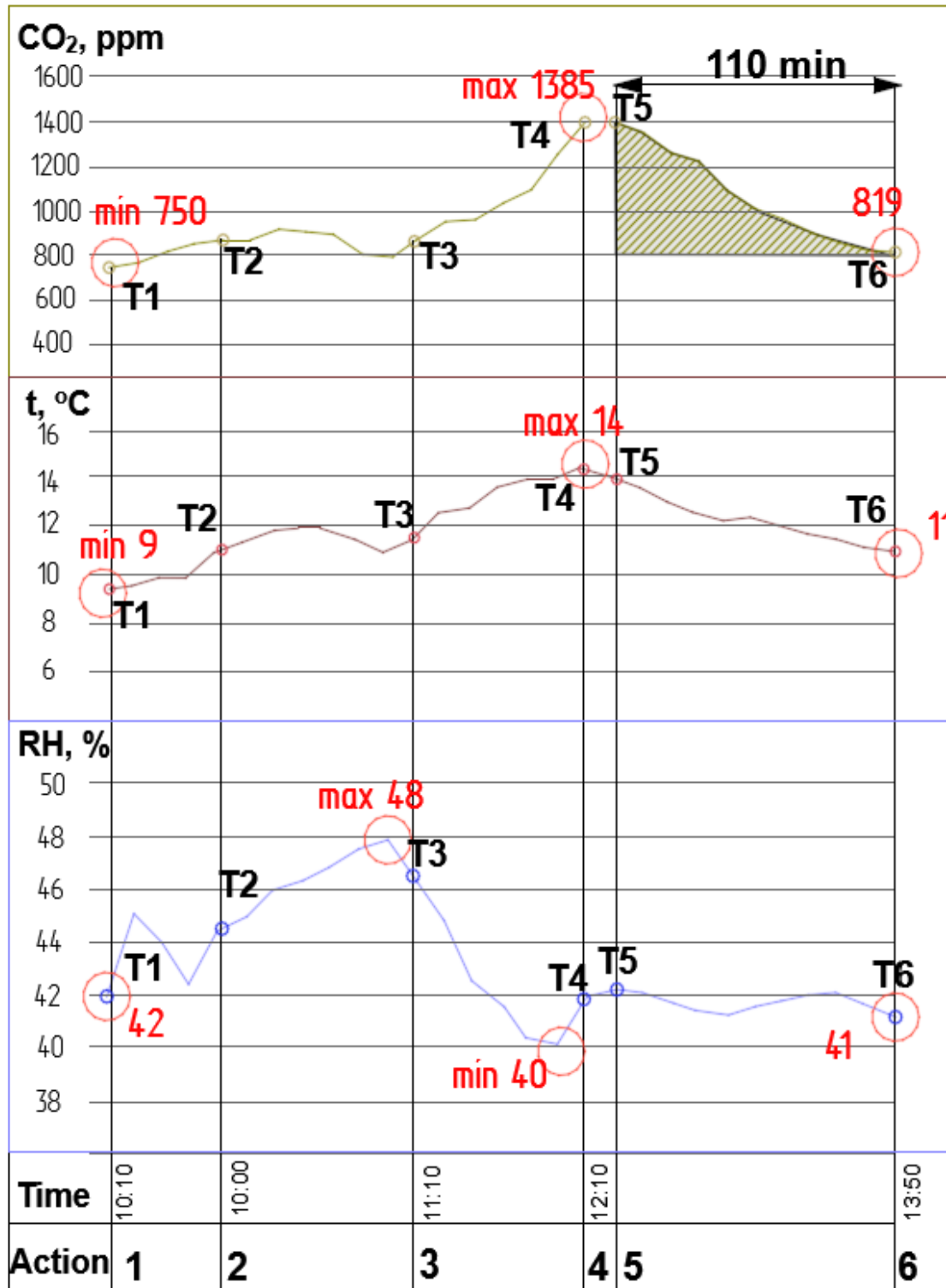


Рис. 2. Графік зміни параметрів концентрації CO₂, температури t, °C та відносної вологості повітря RH, % залежно від режимів експлуатації. Укриття

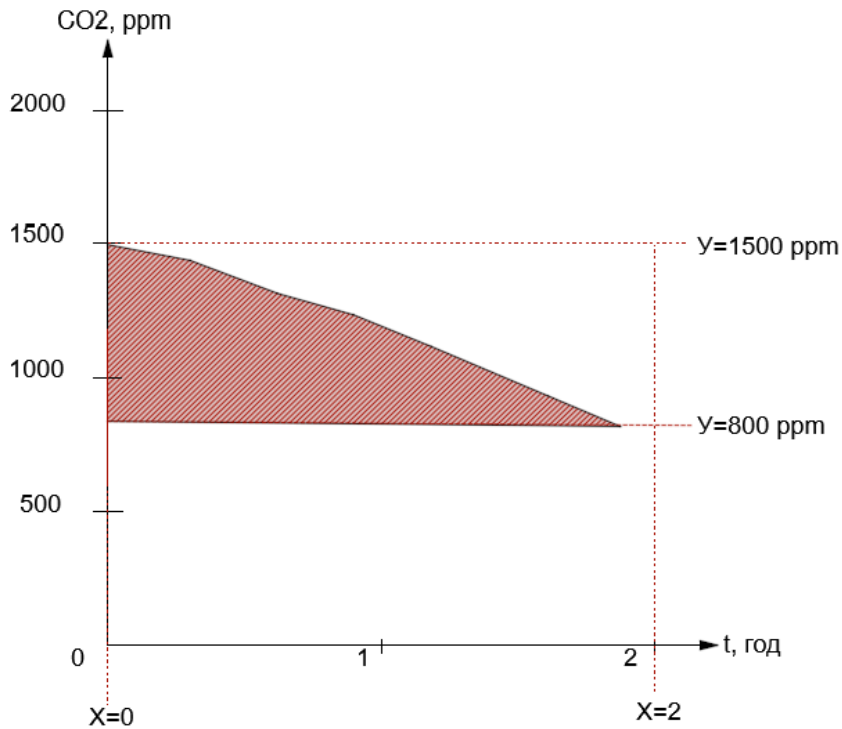


Рис. 3. Графік зниження концентрації CO₂ у квартирі об'ємом 155 м³

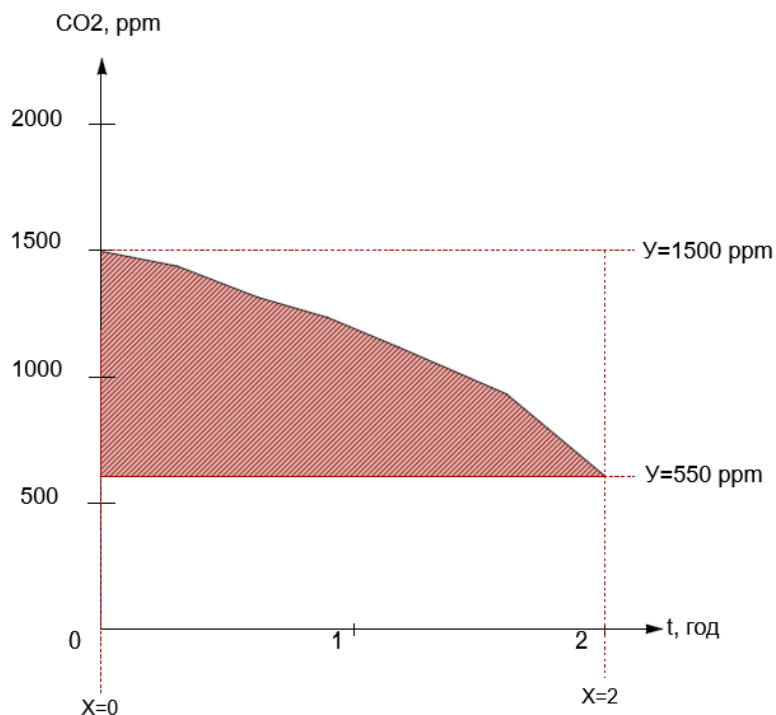


Рис. 4. Графік зниження концентрації CO₂ у квартирі об'ємом 123 м³

За результатами інструментального обстеження параметрів мікроклімату було побудовано графіки зміни параметрів мікроклімату.

Якщо визначити площу геометричної фігури між точкою t₅ та точкою t₆ графіку концентрації CO₂, (рис. 1, 2), то за отриманим відносним показником площі

даної фігури можна оцінити пропускання CO₂ через зовнішні огорожувальні конструкції, тобто оцінити герметичність зовнішньої оболонки будівлі.

Також було промоніторено параметри мікроклімату у двох квартирах об'ємом 155 м³ та об'ємом 123 м³. Зовнішні двері та вікна під час проведення тесту були зачинені. Після того як було зафіксовано максимальне значення концентрації CO₂ 1 500 ppm, усі прилади згорання були вимкнені, усі люди покинули приміщення, зовнішні двері було зачинено. Протягом двох годин фіксувалося зниження значення концентрації CO₂. У першій квартирі об'ємом 155 м³ за дві години значення концентрації CO₂ знизилось на 700 ppm (з 1500 до 800 ppm) (рис. 3). У другій квартирі об'ємом 123 м³ за дві години значення концентрації CO₂ знизилось на 950 ppm (з 1500 до 550 ppm) (рис. 4).

У квартирі об'ємом 123 м³ зафіксовано інтенсивніше зниження концентрації CO₂, ніж у квартирі об'ємом 155 м³. Це означає, що квартира об'ємом 123 м³ менш герметична навіть при меншому об'ємі.

Якщо рівень CO₂ у приміщенні становить 800 ppm – це означає, що в 1 м³ повітря міститься 800 см³ CO₂.

У даному випадку час $t = 2$ і є константою, максимальне значення CO₂ = 1 500 ppm і також є константою.

Умовно на 1 м³ повітря концентрація CO₂ знизилась у першій квартирі на 700 см³:

$$155 \cdot 700 = 108\,500 \text{ см}^3 = 0,1085 \text{ м}^3.$$

Тобто на об'єм 155 м³ за період часу $t = 2$ (const), через оболочку приміщення було втрачено 0,1085 м³ CO₂.

На 1 м³ повітря концентрація CO₂ знизилась у другій квартирі на 950 см³:

$$123 \cdot 950 = 116\,850 \text{ см}^3 = 0,1168 \text{ м}^3.$$

Тобто на об'єм 123 м³ за період часу $t = 2$ (const), через оболочку приміщення було втрачено 0,1168 м³ CO₂.

За показником об'єму CO₂ у м³, який було інфільтровано через зовнішню оболочку за період часу $t = (\text{const})$ можна визначити кількість повітря у м³ яке було інфільтровано через зовнішню оболочку будівлі.

Висновки

Визначено залежність параметрів мікроклімату будівель від концентрації людей та інших факторів. Отримано інструментальний механізм визначення величини інфільтрації.

За допомогою аналізатора CO₂ можна визначити об'єм CO₂ у м³, інфільтрований за період часу $t = (\text{const})$ через зовнішню оболочку будівлі, можна визначити кількість повітря у м³ яке було інфільтровано через зовнішню оболочку будівлі. Дати якісну та кількісну оцінку герметичності зовнішньої оболонки будівлі. Це дасть змогу визначати показник кратності повітрообміну та повітропроникності будинків із невеликим опалювальним об'ємом за допомогою звичайного аналізатора CO₂, без використання системи blow door test і залучення фахівців, що є досить трудомістким та витратним заходом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. E+ UKRENERGY. URL: <https://ukrenergy-erasmusplus.eu/>
2. ДСТУ EN 50292:2016. Сигналізатори оксиду вуглецю для житлових споруд, автопричепів та суден. Настанови щодо вибору, встановлення, застосування та технічного обслуговування. 2016. 51 с.
3. ДСТУ 9190:2022. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. Київ : Мінрегіон України, 2022. 156 с.
4. ISO 9972:2015. Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method, UK Standard, 2015. 38 p.
5. Andriy Bondarenko, Eugene Yurchenko, Olena Koval, Mykola Savyt'skyi. Comparative analysis of microclimate parameters of residential low-rise buildings with different heating systems. *Innovative technologies in construction, civil engineering and architecture*. 2021. Vol. 2678. Pp. 1–8. URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2678/1/020004/2872184/Comparative-analysis-of-microclimate-parameters-of?redirectedFrom=fulltext>

6. Андрій Бондаренко, Євгеній Юрченко, Олена Коваль, Олена Тимошенко. Удосконалення методичних основ визначення герметичності оболонки будівлі. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. С. 27–34. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/264059>
7. Андрій Бондаренко, Євгеній Юрченко, Олена Коваль, Артем Коваль. Визначення повітропроникності будівель. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2024. С. 42–51. URL: https://www.researchgate.net/publication/382719825_Determination_of_air_permeability_of_buildings
8. Šadauskienė J., Šeduikytė L., Paukštys V., Banionis K., Gailius A. The role of air tightness in assessment of building energy performance : Case study of Lithuania. *Energy for Sustainable Development*. 2016. Vol 32. Pp 31–39. URL: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.02.006>
9. ДСТУ EN 9927:2022. Теплотехнічні характеристики будівлі. Визначення повітропроникності будівлі методом випробування тиском. Київ : Мінрегіон України, 2022. 34 с.

REFERENCES

1. E+ UKRENERGY. URL: <https://ukrenergy-erasmusplus.eu/>
2. DSTU EN 50292:2016. *Sygnalizatory oksydu vuhletsyu dlya zhytlovykh sporud, avtoprychepiv ta suden. Nastanovy shchodo vyboru, vstanovlennya, zastosuvannya ta tekhnichnoho obsluhovuvannya* [DSTU EN 50292:2016. Carbon Monoxide Alarms for RVs, Caravans and Marine-selection, Installation, Use and Maintenance Guides]. 2016, 51 p. (in Ukrainian).
3. DSTU 9190:2022. *Metod rozrakhunku enerhospozhyvannya pid chas opalennya, okholodzhennya, ventylyatsiyi, osvitlennya ta haryachoho vodopostachannya* [DSTU 9190:2022. Energy efficiency of buildings. Method for calculating energy consumption during heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply]. Kyiv : Ministry of Regions, 2022, 156 p. (in Ukrainian).
4. ISO 9972:2015. Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method. UK Standard, 2015, 38 p.
5. Andriy Bondarenko, Eugene Yurchenko, Olena Koval and Mykola Savytskyi. Comparative analysis of microclimate parameters of residential low-rise buildings with different heating systems. *Innovative Technologies in Construction, Civil Engineering and Architecture*. 2021, vol. 2678, pp. 1–8. URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2678/1/020004/2872184/Comparative-analysis-of-microclimate-parameters-of?redirectedFrom=fulltext>
6. Andriy Bondarenko, Eugene Yurchenko, Olena Koval and Olena Tymoshenko. *Udoskonalennya metodychnykh osnov vyznachennya hermetychnosti obolonky budivli* [Improvement of methodological basis of determination of tightness of building cover]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2022, pp. 27–34. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/264059> (in Ukrainian).
7. Andriy Bondarenko, Eugene Yurchenko, Olena Koval and Artem Koval. *Vyznachennya povitropronyknosti budivel'* [Determination of air permeability of buildings]. *Ventylyatsiya, osvitlennya ta teplohozopostachannya* [Ventilation, Lighting and Heat and Gas Supply]. 2024, pp. 42–51. URL: https://www.researchgate.net/publication/382719825_Determination_of_air_permeability_of_buildings (in Ukrainian).
8. Šadauskienė J., Šeduikytė L., Paukštys V., Banionis K. and Gailius A. The role of air tightness in assessment of building energy performance : Case study of Lithuania. *Energy for Sustainable Development*. 2016, vol. 32, pp. 31–39. URL: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.02.006>
9. DSTU EN 9927:2022. *Teplotekhnichni kharakterystyky budivli. Vyznachennya povitropronyknosti budivli metodom vyprobuvannya tyskom* [DSTU EN 9927:2022. Thermal technical characteristics of the building determination of air permeability of the building pressure test method]. Kyiv : Ministry of Regions, 2022, 34 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 04.12.2024.

УДК 69.001.5

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.73.1131

ОРГАНІЗАЦІЙНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В БУДІВНИЦТВІ

БОРОДІН М. О.¹, канд. техн. наук, доц.,
ТКАЧ Т. В.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,
МАРТИШ О. О.³, канд. техн. наук, доц.

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 (067) 724-96-31, e-mail: borodin.maksym@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0513-3876

^{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 (096) 231-35-79, e-mail: tkach.taisiia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9433-7514

³ Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (093) 713-23-77, e-mail: martysh.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8864-2555

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена зростаючим попитом будівельної галузі в технологічних інноваціях, які можуть суттєво підвищити її ефективність та конкурентоспроможність. Сучасні будівельні проекти набувають усе більшої складності, отже, традиційні методи управління не завжди можуть забезпечити необхідну швидкість і точність виконання будівельно-монтажних робіт. У подібних умовах впровадження штучного інтелекту (ШІ) сприяє автоматизації значної частини процесів, ефективнішому використанню ресурсів, скорочення термінів виконання проектів та зниження рівня помилок. **Постановка проблеми.** Розглядаються організаційні аспекти застосування штучного інтелекту (ШІ) у будівельній галузі. Мета дослідження полягає у визначенні місця штучного інтелекту в системі організації та управління будівельними проектами, а також у розробці ключових організаційних підходів та стратегій для його ефективного впровадження з метою підвищення продуктивності та оптимізації процесів у будівельній галузі. **Об'єкт дослідження:** процеси організації та управління у будівельній сфері, пов'язані з інтеграцією технологій штучного інтелекту. **Предмет дослідження:** організаційні аспекти, стратегії та механізми впровадження штучного інтелекту у будівництві, включаючи технічні, кадрові та управлінські підходи. Особлива увага приділяється питанням інтеграції інноваційних рішень у виробничі процеси та управлінські структури підприємств. Розглядаються можливі підходи до підвищення ефективності організації робіт, оптимізації ресурсів та автоматизації процесів за допомогою штучного інтелекту. **Висновки дослідження** наголошують на необхідності комплексного підходу до впровадження ШІ, що поєднує технологічні рішення зі змінами в організаційних та управлінських процесах. Запропоновані в статті стратегії спрямовані на підвищення якості та швидкості реалізації будівельних проектів, що має сприяти підвищенню загальної продуктивності галузі.

Ключові слова: штучний інтелект; аналіз даних; організація; ефективність; будівельний проект; автоматизація; управління проектами; організаційні аспекти

ORGANIZATIONAL ASPECTS OF THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CONSTRUCTION

BORODIN M.O.¹, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.
TKACH T.V.^{2*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.
MARTYSH O.O.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. 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 (067) 724-96-31, e-mail: borodin.maksym@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0513-3876

^{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 (096) 231-35-79, e-mail: tkach.taisiia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9433-7514

³ Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (093) 713-23-77, e-mail: martysh.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8864-2555

Abstract. The relevance of the study is due to the growing demand of the construction industry for technological innovations that can significantly increase its efficiency and competitiveness. Modern construction projects are becoming more and more complex, therefore, traditional management methods cannot always ensure the necessary speed and accuracy of construction and assembly works. In such conditions, the introduction of artificial intelligence (AI) contributes to the automation of a significant part of the processes, more efficient use of resources, reduction of project deadlines and reduction of errors. **Raising of problem.** Organizational aspects of artificial intelligence (AI) application in the construction industry are considered. The purpose of the study is to determine the place of artificial intelligence in the system of organization and management of construction projects, as well as to develop key organizational approaches and strategies for its effective implementation in order to increase productivity and optimize processes in the construction industry. **Object of the study:** organizational and management processes in the construction sector related to the integration of artificial intelligence technologies. **Subject of the study:** organizational aspects, strategies and mechanisms for the implementation of artificial intelligence in construction, including technical, personnel and management approaches. Special attention is paid to the issues of integrating innovative solutions into production processes and management structures of enterprises. Possible approaches to increasing the efficiency of work organization, resource optimization and process automation using artificial intelligence are considered. **The research findings** emphasize the need for a comprehensive approach to the implementation of AI, which combines technological solutions with changes in organizational and management processes. The strategies proposed in the article are aimed at improving the quality and speed of implementation of construction projects, which should contribute to increasing the overall productivity of the industry.

Keywords: artificial intelligence; data analysis; organization; efficiency; construction project; automation; project management; organizational aspects

Постановка проблеми. Сучасний світ змінюється завдяки новим технологіям та інструментам. Будівництво, як найважливіша галузь економіки також схильна до цих змін. І штучний інтелект разом з Building Information Modeling (BIM) найперспективніша з усіх напрямків розвитку. Заміна людини на тих роботах [4], де потрібна чіткість в обробці великої кількості інформації чи на тих роботах, де потрібно в сучасному світі створення великої кількості інформації. Це те, де може застосовуватися штучний інтелект. Але постає проблема та низка питань [6]. Як професії та спеціальності зможе ефективно замінити штучний інтелект? В якій пропорції можна залучати штучний інтелект щоби не постраждала якість та ефективність кінцевого продукту в будівництві? Який економічний ефект буде від впровадження штучного інтелекту на різних стадіях реалізації будівельних проєктів? З цього впливає проблема залучення штучного інтелекту (в деяких випадках) як організаційної одиниці в структуру виконання окремих робіт, етапів та будівельного проєкту в цілому. Мається на увазі, що там, де штучний інтелект заміняє собою людину на його робочому місці, ми повинні врахувати організаційні зміни. З'являється новий суб'єкт планування та

організації, який має свої особливості та вимоги до впровадження в конкретну ланку реалізації будівельного проєкту, як на стадії проєктування об'єкту так і на стадії будівництва та експлуатації.

Аналіз публікацій. Проблемами використання штучного інтелекту в будівництві займаються такі вчені як Савицький М. В., Данішевський В. В, Гайдар А. М. [4], Веркалець С. М. [1], Лялюк О. Г. [3], Осипенко Р. С., Глибовець М. М. [2], Олецький О. В. та інші. Цей напрямок дуже актуальний сьогодні та привертає увагу спеціалістів з усіх сфер діяльності людини в будівництві і не тільки в будівництві. В деяких публікаціях застосування штучного інтелекту впроваджено вже на реальних завданнях та практичних цілях, в деяких лише на теоретичному рівні, що потребує більш досконалого подальшого вивчення.

Мета та постановка завдань. Мета дослідження полягає в визначенні місця штучного інтелекту в системі організації і управління будівельними проєктами та врахуванні можливостей штучного інтелекту в підвищенні ефективності реалізації будівельних проєктів.

Завдання:

- проаналізувати стан впровадження штучного інтелекту в сучасні форми організації будівельних проєктів;

- визначити ключові напрями економії при впровадженні штучного інтелекту в будівельні процеси;

- розробити стратегії інтеграції штучного інтелекту в реалізацію будівельних проєктів.

Результати досліджень. Використання технології Building Information Modeling (BIM) у поєднанні з штучним інтелектом має потенціал радикально змінити будівельну індустрію, в тому числі організацію будівництва. Нижче наведено кілька ключових перспектив, які на нашу думку, є найбільш важливими:

- **Інтелектуальні алгоритми:** штучний інтелект може автоматизувати багато аспектів проєктування, включаючи генерацію архітектурних планів, оптимізацію, простору та навіть врахування енергоефективності. Інструменти на основі штучного інтелекту можуть аналізувати дані про будівлі, історію проєктів та нормативні вимоги, що дозволяє швидше і точніше створювати проєкти.

- **Генеративний дизайн:** штучний інтелект може використовувати генеративний дизайн, щоб розробити безліч варіантів проєктів на основі визначених параметрів. Це дозволяє архітекторам і інженерам вибрати оптимальні рішення, які можуть бути недоступні через традиційний підхід.

- **Аналіз даних:** штучний інтелект може автоматично перевіряти проєкти на відповідність нормативним вимогам, виявляти потенційні проблеми та навіть прогнозувати можливі ризики. Це зменшує ймовірність помилок і підвищує ефективність процесу.

- **Реалістичні симуляції:** штучний інтелект може проводити симуляції для оцінки, як зміни в дизайні вплинуть на функціональність, енергетичні витрати та інші параметри.

- **Моніторинг якості:** штучний інтелект може використовуватися для автоматичного моніторингу будівельних

стандартів і якості виконання робіт. Це включає виявлення дефектів за допомогою комп'ютерного зору та аналітики даних.

- **Аудит і compliance:** штучний інтелект може допомогти в автоматизації перевірки відповідності будівельних норм і стандартів. Замість людських інспекторів, які проводять аудит, штучний інтелект може постійно відстежувати відповідність і генерувати звіти.

- **Інтеграція даних:** штучний інтелект може об'єднувати дані з різних джерел (проєктування, будівництво, експлуатація) для забезпечення цілісного огляду проєкту. Це допомагає зменшити помилки, що виникають через неузгодженість інформації.

- **Автоматизоване управління проєктами:** штучний інтелект може допомогти в управлінні проєктами, автоматизуючи планування, розподіл ресурсів і управління ризиками.

Попри всі ці можливості, повна заміна проєктувальників і контролюючих органів людьми штучним інтелектом є малоімовірною в найближчому майбутньому. Людський досвід, креативність і здатність до адаптації до нових умов під час вирішення складних завдань залишаються важливими. Можна стверджувати, що штучний інтелект скоріше буде доповнювати людську діяльність, автоматизуючи рутинні задачі та надаючи інструменти для підвищення ефективності.

Якщо розглядати використання штучного інтелекту (ШІ) на різних етапах будівельного проєкту це може варіюватися в залежності від конкретних потреб і стадії реалізації проєкту (табл. 1).

Треба додати, що доля залучення ШІ може змінюватися в залежності від специфіки проєкту, рівня автоматизації та технологічного прогресу і це також потрібно враховувати при плануванні організаційної структури будівельного проєкту в цілому і його частин в зокрема.

Але питання штучного інтелекту напряму пов'язана з людьми. Постає організаційне питання: які професії в будівельній галузі на будівельному майданчику чи в офісах будівельних

компаній зможе замінити штучний інтелект. Це питання як організаційне так і економічне. Який економічний ефект від впровадження штучного інтелекту? Спочатку треба визначитися де можна використовувати ШІ без шкоди для кінцевого результату. Це і проєктувальники і архітектори, це інженери та менеджери

проєктів, це ті, хто займається управлінням ресурсами і плануванням, прогнозуванням ризиків, бюджетуванням та фінансовим аналізом, оцінкою витрат, це контролери якості та інспектори, виконавчі інженери та робітники, планувальники і координатори, адміністративні працівники.

Таблиця 1

Оптимальна доля залучення штучного інтелекту на різних етапах реалізації будівельного проєкту

№	Етапи реалізації	Залучення ШІ	Завдання	Методи
1	Виникнення ідеї (Концептуалізація)	10–20 %	ШІ може допомогти в аналізі ринку, оцінці потенційних локацій, прогнозуванні трендів і навіть у формуванні концепції проєкту на основі великих обсягів даних	Аналітика даних, прогнозування тенденцій, генерація ідей на основі історичних даних
2	Проектування	20–40 %	Автоматизація створення дизайну, аналіз різних варіантів проєкту, оптимізація простору, енергетичний аналіз	Генеративний дизайн, оптимізація планів, моделювання будівельної інформації (BIM) з інтеграцією ШІ
3	Планування і затвердження	10–20 %	Перевірка відповідності нормативним вимогам, автоматизація документів, підготовка звітів для затвердження	Аналіз відповідності, автоматичне складання документації
4	Будівництво	30–50 %	Моніторинг якості будівництва, управління проєктами, контроль за витратами і ресурсами, управління ризиками	Аналіз зображень (комп'ютерний зір), прогнозування ризиків, автоматизація управлінських процесів
5	Експлуатація	20–30 %	Управління об'єктом, моніторинг стану будівлі, управління енергією, прогнозування технічного обслуговування	Інтелектуальні системи управління будівлею (BMS), аналіз даних з сенсорів, предиктивне обслуговування

Зазначимо, що людські якості (креативність, управлінський досвід і прийняття рішень у складних умовах), все ще залишаються важливими, незважаючи на здатність штучного інтелекту, який може автоматизувати багато рутинних завдань і процесів. Тому замість повної заміни професій, швидше за все, відбудеться їх трансформація, і багато фахівців будуть займатися більш стратегічними і творчими завданнями, а рутинні процеси перейдуть до автоматизованих систем.

Використання штучного інтелекту в процесі будівництва може принести суттєві економічні вигоди. Хоча конкретні цифри можуть варіюватися залежно від проєкту, географічного розташування та впроваджених технологій, загалом можна

оцінити кілька ключових аспектів економічного ефекту (табл. 2).

Виходячи з вищенаведеного аналізу і залежно від масштабу і типу будівельного проєкту, загальний економічний ефект від використання штучного інтелекту може варіюватися від 10 до 30% на одиницю будівельного об'єму. Це може означати, що економічний ефект в грошових одиницях може становити від 1 000 до 3 000 грн на кожен одиницю будівельного об'єму, залежно від конкретного проєкту та впроваджених технологій. Важливо зазначити, що ці цифри є орієнтовними. Однак загальний тренд вказує на значні потенційні вигоди від інтеграції штучного інтелекту у будівельний процес.

З перспективою на майбутнє, штучний інтелект має потенціал радикально змінити

будівельну індустрію, створюючи нові можливості для проєктування, будівництва та експлуатації об'єктів. Ось кілька шляхів розвитку будівельної індустрії за допомогою штучного інтелекту (табл. 3).

Таблиця 2

Напрямки економії під час використання штучного інтелекту в процесі будівництва

№	Напрямок економії	Економія	Пояснення
1	Зниження витрат на проєктування	5–15 % на витратах на проєктування	ШІ може автоматизувати багато завдань, таких як генеративний дизайн, оптимізація планів, і перевірка на відповідність. Це зменшує потребу в людському втручанні, знижуючи витрати на проєктування
2	Оптимізація витрат на будівництво	10–20 % на витратах на будівельні роботи	ШІ допомагає у плануванні і управлінні ресурсами, прогнозуванні витрат, а також в автоматизації процесів. Це може призвести до скорочення витрат на матеріали і робочу силу
3	Зменшення часу виконання проєкту	5–10 % зменшення загального часу виконання проєкту	Оптимізація процесів і автоматизація завдань допомагають зменшити затримки та пришвидшити виконання завдань. Це, в свою чергу, зменшує загальні витрати на проєкт
4	Зниження витрат на обслуговування та експлуатацію	5–15 % на витратах на обслуговування та експлуатацію	Інтелектуальні системи управління будівлею (BMS) та прогнози на основі ШІ можуть зменшити витрати на енергію, технічне обслуговування та ремонти, шляхом моніторингу і оптимізації ресурсів
5	Зменшення помилок і дефектів	2–5 % на витратах на виправлення помилок і дефектів	ШІ може автоматично виявляти помилки і дефекти на ранніх етапах, що зменшує потребу в додаткових витратах на виправлення і перепланування
6	Покращення безпеки та зменшення витрат на страхування	5–10 % на витратах на страхування та безпеку	Впровадження технологій моніторингу і управління безпекою на основі ШІ може зменшити ймовірність нещасних випадків і знижувати витрати на страхування

Таблиця 3

Шляхи залучення штучного інтелекту в реалізацію будівельних проєктів

№	Шляхи залучення штучного інтелекту	Опис	Приклад
1	Інтелектуальні автономні будівельні роботи	Використання автономних роботів, які оснащені ШІ для виконання будівельних завдань без людського втручання. Ці роботи можуть самостійно планувати та виконувати складні завдання, такі як кладка цегли, монтаж конструкцій, і навіть фінішні оздоблення	Роботи, які можуть будувати будівлі з використанням 3D-друку в реальному часі, адаптуючи свої дії на основі змінних умов будівельного майданчика
2	Самонавчальні архітектурні системи	ШІ системи, які не тільки генерують архітектурні проєкти, але й постійно вчаться на основі зворотного зв'язку і попередніх проєктів, оптимізуючи дизайн у реальному часі.	Архітектурні інструменти на базі ШІ, які аналізують тисячі проєктів і даних, щоб створювати нові, інноваційні проєкти з урахуванням ефективності, стилю і функціональності.
3	Екологічні будівлі, що самовідновлюються	Будівлі, які використовують ШІ для самостійного моніторингу і відновлення зношених або пошкоджених частин будівлі. Це може включати використання матеріалів, які самостійно ремонтують тріщини або пошкодження	Інтелектуальні фасади, які автоматично очищаються і ремонтуються, завдяки вбудованим сенсорам і самовідновлювальним матеріалам
4	Віртуальні міста з інтегрованими ШІ	Розвиток міст, де всі аспекти управління і функціонування контролюються і оптимізуються за допомогою ШІ. Це включає управління трафіком, енергетичними ресурсами, водопостачанням і навіть соціальними аспектами	Міста, де всі інфраструктурні системи з'єднані в єдину платформу, що дозволяє оптимізувати енергоспоживання, уникати заторів і забезпечувати безперервне обслуговування.

5	Автоматизоване проєктування на основі віртуальних симуляцій	Використання ІІІ для створення віртуальних симуляцій, які дозволяють проєктувальникам взаємодіяти з фізичними і цифровими моделями в реальному часі, тестуючи і оптимізуючи проєкти перед їх реальним втіленням	Інструменти віртуальної і доповненої реальності, які дозволяють проєктувальникам «переміститися» всередину будівлі ще до початку будівництва, проводячи тести на функціональність і дизайн
6	Інтелектуальні матеріали і конструкції	Розробка нових матеріалів, які реагують на зміни в навколишньому середовищі і адаптуються до умов. Це може включати «розумні» стіни, які регулюють температуру, або матеріали, що змінюють свою форму залежно від погодних умов	Матеріали, які автоматично регулюють свою теплоізоляцію або поглинають шум в залежності від навколишнього середовища
7	Прогнозування і управління ризиками	ІІІ, який використовує великі дані для прогнозування і управління ризиками на всіх етапах будівництва, від проєктування до експлуатації. Це може включати виявлення потенційних проблем до їх виникнення	Системи ІІІ, які аналізують історичні дані і поточні умови для прогнозування можливих аварій або затримок і автоматично коригують плани для мінімізації впливу.
8	Глобальні будівельні мережі на базі ІІІ	Міжнародні платформи для спільного проєктування і реалізації будівельних проєктів, де фахівці з усього світу можуть співпрацювати через інтегровані ІІІ системи	Платформи для глобальної колаборації, де ІІІ автоматично обробляє дані з різних джерел і координує дії міжнародних команд

Таблиця 4

Класифікація можливих ризиків від використання штучного інтелекту

	Класифікація	Ризики	Можливі наслідки
1	Безпека і конфіденційність даних	ІІІ системи вимагають великих обсягів даних для навчання і роботи. Неправильне управління даними може призвести до порушення конфіденційності або крадіжки особистої інформації	Витік або зловживання даними можуть негативно вплинути на учасників проєкту і стати причиною юридичних і фінансових проблем
2	Залежність від технологій і збоїв в системах	Залежність від ІІІ може призвести до уразливості у випадку збоїв у системах або програмних помилок. Неправильна робота ІІІ може призвести до серйозних проблем на будівельному майданчику	Затримки в будівництві, збільшення витрат і навіть небезпека для життя і здоров'я працівників через несправності технологій
3	Втрата робочих місць	Автоматизація процесів за допомогою ІІІ може призвести до скорочення кількості робочих місць для людей, особливо в рутинних і повторюваних завданнях.	Соціальні наслідки, такі як безробіття і економічні труднощі для працівників, які можуть бути заміщені технологіями
4	Етичні питання і прийняття рішень	ІІІ може приймати рішення на основі алгоритмів, які не завжди враховують етичні або соціальні аспекти. Це може викликати проблеми, якщо системи не здатні правильно оцінювати людські потреби або місцеві умови	Неправильні або несправедливі рішення, які можуть мати негативні наслідки для громадських інтересів або інтересів окремих осіб.
5	Вартість впровадження і обслуговування	Впровадження і обслуговування ІІІ технологій можуть бути дорогими, і невеликим компаніям може бути важко впоратися з такими витратами	Збільшення загальних витрат на проєкти, що може зменшити їх рентабельність або ускладнити доступ до інноваційних технологій для менших фірм
6	Виклики в інтеграції і сумісності	ІІІ системи можуть не завжди бути сумісними з існуючими будівельними процесами або обладнанням. Це може вимагати значних змін у процесах або додаткових витрат на адаптацію	Затримки в реалізації проєктів, необхідність переробки або переобладнання існуючих систем
7	Регуляторні і юридичні проблеми	ІІІ в будівництві може зіткнутися з недосконалістю існуючих регуляторних норм і стандартів. Невизначеність у питаннях правового статусу і відповідальності може стати перешкодою для впровадження нових технологій	Юридичні проблеми і штрафи, затримки в реалізації проєктів, а також труднощі з відповідністю нормативним вимогам

8	Зміни в навичках і підготовці кадрів	Впровадження ШІ може вимагати нових навичок і знань від працівників. Це може створити розрив у навичках між тими, хто має доступ до нових технологій, і тими, хто залишився позаду.	Потреба в перепідготовці кадрів або проблеми з наймом кваліфікованих фахівців.
9	Проблеми з точністю і надійністю	Алгоритми ШІ можуть бути неточними або мати помилки, що може призвести до неправильної інформації або рішень, які вплинуть на якість будівельних робіт.	Ризик появи дефектів в будівництві, що може вплинути на безпеку і довговічність будівель

Ці концепції можуть суттєво змінити будівельну індустрію, зробивши її більш ефективною, безпечною і екологічною, а також забезпечивши нові можливості для розвитку і інновацій. Але це потребує і нового алгоритму організації управління будівництвом, в тому числі в календарному плануванні, в кошторисній документації та експертизі проєктної документації.

Але крім того що використання штучного інтелекту в будівельній індустрії відкриває нові можливості, але також несе з собою низку ризиків і викликів. Ось деякі з них (табл. 4).

Висновки

Впровадження штучного інтелекту у роботу будівельних організацій та реалізацію будівельних проєктів значно підвищує їх ефективність та конкурентоспроможність. Основними перевагами застосування штучного інтелекту є:

1. Оптимізація процесів, а саме: автоматизація завдань, скорочення витрат часу та ресурсів, що призводить до більш ефективного управління будівельними проєктами.

2. Прийняття обґрунтованих рішень: аналіз великих масивів обробки даних, зібраних на етапах проєктування, будівництва та експлуатації, допомагає швидко та раціонально приймати рішення на основі реальних показників.

3. Зниження ризиків: завдяки прогнозу ризиків, заснованому на аналізі даних, ШІ

дає можливість передбачати потенційні проблеми та уникати зриву будівельного процесу (простоїв).

4. Підвищення якості та безпеки: технології ШІ сприяють кращому контролю якості виконуваних робіт та забезпеченню відповідності проєктів нормативним вимогам. ШІ також може мінімізувати ризики безпеки на будівельних майданчиках.

5. Ефективне управління ресурсами: використання ШІ забезпечує більш ефективне планування матеріальних ресурсів, технічного обладнання та робочої сили, що сприяє скороченню витрат та підвищення прибутковості.

6. Інновації у проєктуванні: застосування ШІ у BIM-моделях (Building Information Modeling) сприяє інтеграції інноваційних підходів у процес проєктування та дозволяє більш точному прогнозуванню строків виконання будівельно-монтажних робіт та витрат.

З точки зору місця штучного інтелекту в організаційній структурі будівельних організацій чи організації будівельного проєкту важливо наново прописати обов'язки та відповідальності кожного окремого місця в вертикалі та горизонталі технологічних процесів та руху інформації. Заміна робочих місць штучним інтелектом вимагає більш досконалого вивчення можливостей та ризиків його використання в кожній окремій ситуації та одиниці прийняття рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Веркалець С. М. Використання штучного інтелекту та якості продукції – основа ефективності будівельного виробництва. *Технології добросовісного використання штучного інтелекту у сфері освіти та науки : матер. всеукр. наук.-пед. підвищення кваліфікації, 31 липня – 10 вересня 2023 року*. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2023. С. 42–46.

2. Глибовець М. М., Олецький О.В. Штучний інтелект. Київ : Києво-Могилянська академія, 2002. 364 с.

3. Лялюк О. Г., Осипенко Р. С. Особливості імплементції штучного інтелекту в будівництві. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Т. 35, № 2 (2023). С. 172–176.
4. Савицький М. В., Данішевський В. В., Гайдар А. М. Методи штучного інтелекту та їх застосування в будівництві. Тези всеукраїнського науково-практичного форуму «Переможемо – Відбудуємо!». Дніпро : Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, 29–30 червня 2022 р. С. 83–86. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/9354/Savytskyi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
5. Стецюк М. Штучний інтелект навчився створювати архітектурні проекти без участі людини. URL: <https://ecotech.news/architecture/604-shtuchnij-intelekt-navchivsya-stvoryuvati-arkhitekturni-proekti-bez-uchastilyudini.html>
6. Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні : монографія. Київ : Наука і освіта, 2023. С. 305.
7. Цифроцента. Як епоха нейромерж змінює архітектуру. URL: <https://pragmatika.media/tsyfrochento-iak-epokha-neiromerezh-zminiuearkhitekturu/>
8. Шевченко А. І. Світові тенденції та практичні досягнення у проблемі штучного інтелекту. Київ : Наукова думка, 2010. С. 561–572. URL: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2019/11/11/13-mindblowing-things-artificial-intelligence-can-already-do-today/#8e22a4665020>
9. Eberhart R., Shi Yu, Kennedy J. *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann, Elsevier, 2001. 512 p.
10. K. Gwang-Hee, Y. Jie-Eon, S. Ana, Chob Hun-Hee. Neural network model incorporating a genetic algorithm in estimating construction costs. *Building and Environment*. 2004. № 39. Pp. 1333–1340. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.03.009>

REFERENCES

1. Verkalets S.M. *Vykorystannia shtuchnoho intelektu ta yakosti produktsii – osnova efektyvnosti budivelnogo vyrobnytstva* [The use of artificial intelligence and product quality is the basis of the efficiency of construction production]. *Tekhnologii dobrochesnoho vykorystannia shtuchnoho intelektu u sferi osvity ta nauky : materialy vseukrainskoho naukovo-pedahohichnoho pidvyshchennia kvalifikatsii, 31 lypnia – 10 veresnia 2023 roku* [Technologies of virtuous use of artificial intelligence in the field of education and science : materials of the All-Ukrainian scientific and pedagogical professional development, July 31 – September 10, 2023]. Odesa : Helvetyka publ., 2023, pp. 42–46. (in Ukrainian).
2. Hlybovets M.M. and Oletskyi O.V. *Shtuchnyi intelekt* [Artificial intelligence]. Kyiv : Kyievo-Mohylianska akademiia Publ., 2002, 364 p. (in Ukrainian).
3. Lialiuik O.H. and Osypenko R.S. *Osoblyvosti implementatsii shtuchnoho intelektu v budivnytstvi* [Features of the implementation of artificial intelligence in construction]. *Suchasni tekhnologii, materialy i konstruktii v budivnytstvi* [Modern Technologies, Materials and Structures in Construction]. Vol. 35, no. 2, 2023, pp. 172–176. (in Ukrainian).
4. Savytskyi M.V., Danishevskiy V.V. and Haidar A.M. *Metody shtuchnoho intelektu ta yikh zastosuvannia v budivnytstvi* [Methods of artificial intelligence and their application in construction]. *Tezy vseukrainskoho naukovo-praktychnoho forumu “Peremozhemo – Vidbuduiemo!”* [Theses of the all-Ukrainian scientific and practical forum “We will win – we will rebuild!”]. Dnipro : PSACEA, 29–30 June, 2022, pp. 83–86. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/9354/Savytskyi.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (in Ukrainian).
5. Stetsiuk M. *Shtuchnyi intelekt navchivsya stvoriuvaty arkhitekturni proekty bez uchasti liudyny* [Artificial intelligence has learned to create architectural projects without human intervention]. URL: <https://ecotech.news/architecture/604-shtuchnij-intelekt-navchivsya-stvoryuvati-arkhitekturni-proekti-bez-uchastilyudini.html> (in Ukrainian).
6. *Stratehiia rozvytku shtuchnoho intelektu v Ukraini : monografiia* [Strategy for the development of artificial intelligence in Ukraine : monograph]. Kyiv : Nauka i osvita Publ., 2023, p. 305. (in Ukrainian).
7. *Tsyfrochento. Yak epokha neiromerezh zminiue arkhitekturu* [Digicento. How the age of neural networks is changing architecture]. URL: <https://pragmatika.media/tsyfrochento-iak-epokha-neiromerezh-zminiuearkhitekturu/> (in Ukrainian).
8. Shevchenko A.I. *Svitovi tendentsii ta praktychni dosiahnennia u problemi shtuchnoho intelektu* [World trends and practical achievements in the problem of artificial intelligence]. Kyiv : Naukova Dumka publ., 2010, pp. 561–572. URL: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2019/11/11/13-mindblowing-things-artificial-intelligence-can-already-do-today/#8e22a4665020> (in Ukrainian).
9. Eberhart R., Shi Yu and Kennedy J. *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann, Elsevier, 2001, 512 p.
10. K. Gwang-Hee, Y. Jie-Eon, S. Ana and Chob Hun-Hee. Neural network model incorporating a genetic algorithm in estimating construction costs. *Building and Environment*. 2004, no. 39, pp. 1333–1340. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.03.009>

Надійшла до редакції: 28.11.2024.

УДК 74:687.1

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.81.1132

НОВІ СПОСОБИ РОЗРОБКИ ТИПОГРАФІЧНОГО ПОРТРЕТУ В РЕДАКТОРАХ РАСТРОВОЇ ГРАФІКИ ADOBE PHOTOSHOP ТА ВЕКТОРНОЇ ГРАФІКИ ADOBE ILLUSTRATOR

ВАРЧЕНКО Ю. Е., *Ph.D.*, доц.

Кафедра графічного дизайну, Український гуманітарний інститут, вул. Університетська, 14, 08292, Буча, Київська обл., Україна, тел. +38 (066) 081-78-59, e-mail: yu.varchenko@ugi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0009-8658-0811

Анотація. *Постановка проблеми.* У цій статті детально розглядаються шляхи удосконалення способів розробки типографічного портрету в редакторах растрової графіки Adobe Photoshop та векторної графіки Adobe Illustrator, які дозволяють зменшити трудомісткість процесу розробки портрету, спростити цей процес та підвищити якість остаточного зображення. Такі рішення пов'язані з тим, що робота по створенню дизайн-проектів вимагає великих трудовитрат, характеризується інтенсивністю праці і значним емоційним напруженням, що в кінцевому результаті позначається на продуктивності і якості роботи і може стати джерелом професійних захворювань. **Мета дослідження.** Розробка ефективних способів створення типографічного портрету в редакторах растрової та векторної графіки, які дозволять знизити трудомісткість процесу розробки, спростити цей процес та підвищити якість зображення при проектуванні типографічного портрета. **Методологія.** Методологічна основа дослідження ґрунтується на використанні загальнонаукових методів дослідження: аналізу, порівняння, узагальнення різноманітних ідей і пропозицій вітчизняних і зарубіжних вчених з проблем визначення шляхів зниження трудомісткості робіт, спрощення процесу розробки та підвищення якості зображення при проектуванні типографічного портрета в редакторах векторної та растрової графіки. **Висновки.** Запропонований спосіб розробки типографічного портрету в редакторі растрової графіки Adobe Photoshop дозволяє знизити трудомісткість робіт за рахунок зменшення використання кількості операцій та інструментів. В запропонованому способі розробки типографічного портрету в редакторі векторної графіки Adobe Illustrator, зменшення трудомісткості процесу розробки типографічного портрету, спрощення цього процесу та підвищення якості остаточного зображення досягається за рахунок виключення додаткових програм для обробки фотографії та перетворення тексту в криві для трансформації літер по вибраним контурам фото.

Ключові слова: *розробка типографічного портрета; трудомісткість робіт; спрощення процесу розробки; підвищення якості зображення; растрова та векторна графіка*

NEW WAYS TO DESIGN A TYPOGRAPHIC PORTRAIT IN ADOBE PHOTOSHOP RASTER AND ADOBE ILLUSTRATOR VECTOR GRAPHICS EDITORS

VARCHENKO Yu.E., *Ph.D.*, Ass. Prof.

Department of Graphic Design, Ukrainian Institute of Arts and Sciences, 14, St. University, Bucha, 08292, Kyiv region, Ukraine, tel. +38 (066) 081-78-59, e-mail: yu.varchenko@ugi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0009-8658-0811

Abstract. Problem statement. This article examines in detail ways to improve the methods of developing a typographic portrait in the Adobe Photoshop raster graphics editor and Adobe Illustrator vector graphics editor, which allow reducing the complexity of the portrait development process, simplifying this process and improving the quality of the final image. Such solutions are due to the fact that the work on creating design projects requires a lot of labor, is characterized by labor intensity and significant emotional stress, which ultimately affects productivity and quality of work and can become a source of occupational diseases. **Research objective.** Development of effective methods for creating a typographic portrait in raster and vector graphics editors, which will reduce the complexity of the development process, simplify this process and improve the quality of the image when designing a typographic portrait. **Methodology.** The methodological basis of the research is based on the use of general scientific research methods: analysis, comparison, generalization of various ideas and proposals of domestic and foreign scientists on the problems of determining ways to reduce the complexity of work, simplify the development process and improve image quality when designing a typographic portrait in vector and raster graphics editors. **Conclusions.** The proposed method for

developing a typographic portrait in the Adobe Photoshop raster graphics editor allows you to reduce the complexity of work by reducing the number of operations and tools used. In the proposed method of developing a typographic portrait in the vector graphics editor Adobe Illustrator, reducing the complexity of the typographic portrait development process, simplifying this process, and improving the quality of the final image is achieved by eliminating additional programs for photo processing and converting text into curves for transforming letters along the selected photo contours.

Keywords: *development of a typographic portrait; laboriousness of the work; simplification of the development process; improvement of image quality; raster and vector graphics*

Постановка проблеми. Професія графічного дизайнера дуже цікава, престижна, здається навіть романтичною і користується великим попитом на сучасному ринку праці. Але в той же час робота по створенню дизайн-проектів з використанням комп'ютерних технологій вимагає великих трудовитрат, характеризується інтенсивністю праці і значним емоційним напруженням, що в кінцевому результаті позначається на продуктивності і якості роботи і може стати джерелом професійних захворювань. Ці наслідки професійних ризиків для графічного дизайнера насамперед пов'язані з використанням комп'ютерної техніки, яка застосовується для розробки більшості проектів, зокрема типографічних портретів чи плакатів [1; 2].

При сучасному розвитку комп'ютерної техніки та програмного забезпечення, що використовується для виконання графічних робіт, розробка типографічного портрету або плаката може виконуватися різними способами, які можуть характеризуватися великою кількістю операцій, пов'язаних з використанням двох і більше програм редагування, значною кількістю задіяних програмних засобів, порядком їх застосування та ін. Всі ці фактори можуть збільшувати або зменшувати загальну трудомісткість роботи, яка на сьогодні встановлена в Україні базовим нормативом трудомісткості на розробку. Наприклад, для шрифтового плаката вона може становити 0,12–0,4 людино-місяця [3]. Тобто, на виконання одного типографічного плакату може піти від 4 до 12 діб в залежності від категорії складності. Крім того, недосконалість методики розробки типографічного портрету може ускладнити роботу і погіршити якість кінцевого

зображення, наприклад, через неможливість передати дрібні деталі портрета прийнятним способом нанесення шрифтів.

На жаль, в Україні недостатньо вивчена проблема трудомісткості методів розробки типографічних портретів і плакатів, їх складності та якості виконання. Теоретична база для оцінки ефективності способів розробки типографічних портретів і плакатів в тому чи іншому графічному редакторі відсутня, а самі способи майже не мають теоретичної бази для їх реалізації. У той же час в інтернеті є велика кількість інформації та відеороликів, на яких автори діляться лише своїми навичками в розробці типографічних портретів і плакатів в тій чи іншій програмі, або демонструють готові роботи на стокових сайтах [pinterest.com](https://www.pinterest.com), [behance.net](https://www.behance.net) та ін.

На наш погляд, така ситуація є неприпустимою і вимагає розробки теоретичної бази проектування або вибору ефективного способу розробки типографічного портрета в растрових або векторних графічних редакторах, що дозволить знизити трудомісткість робіт при реалізації такого способу, спростити процес розробки і покращити якість проектного зображення. У зв'язку з цим, виходячи з власного досвіду та відомих теоретичних і практичних праць інших авторів, ми пропонуємо два нових способи розробки типографічного портрету, що обумовлює актуальність даної статті «Нові способи розробки типографічного портрету в редакторах растрової графіки Adobe Photoshop та векторної графіки Adobe Illustrator».

Аналіз публікацій. Використання шрифтів для створення зображень належить до розділу типографіки – мистецтва складання друкованих знаків і поліграфії.

Портрети, створені з тексту, називаються типографічними портретами [1; 2; 4], вони розробляються за допомогою шрифтів на основі обраної фотографії. Тому такі портрети мають три основні складові: шрифт, фотографію та графіку.

Відомий спосіб створення типографічного портрету, при якому використовують перо й туш або фарбу [2, с. 43]. За даним способом по верх фотографії наносяться контури, по яким потім пишеться текст.

Недоліком такого способу створення типографічного портрету є неможливість застосування мультимедійних технологій для створення портрету, значні затрати часу на виконання робіт вручну, якість зображення залежить від особистих навичок окремої людини.

Відомий спосіб створення типографічного портрету, який полягає в тому, що типографічний портрет виконується у редакторі Adobe Photoshop, з використанням фільтра Displace та деяких режимів накладання для досягнення ефекту портрет [2, с. 43]. За даним способом обирають контрастну фотографію та перетворюють її в чорно-білий формат в програмі Photoshop. Наступним кроком, за допомогою фільтрів «Контурна різкість» (Unsharp Mask) та «Окреслені краї» (Poster Ages) виявляються основні риси портрета, фільтром «Аплікація» (Cutout) видаляють дрібні деталі і командою «Мікшування каналів» знебарвлюють зображення [2, с. 44–47]. Після цього створюють портрет за допомогою інструментів «Перо» (Pen) та «Текст» (Text). Недоліками такого способу є його трудомісткість через велику кількість операцій, необхідність створювати декілька робочих шарів для створення зображення та застосування великої кількості фільтрів та інших інструментів, що ускладнює роботу над типографічним портретом.

Відомий спосіб створення текстового портрету в Adobe Illustrator [5], який полягає в тому, що фотографію спочатку завантажують в Adobe Photoshop і створюють її силуетну версію за рахунок

знебарвлення, додавання коригуючого шару «Рівні» та зафарбування непотрібних елементів інструментом «Пензель», потім отриману силуетну версію фотографії завантажують в Adobe Illustrator і по верх її пишуть інструментом «Текст» бажані букви або слова, які потім спотворюють по формі одного з елементів зображення за допомогою команди «Спотворення оболонки по сітці», при потребі корегують текст командою «Редагувати вміст», операції написання тексту, його спотворення та розміщення уздовж елементів фотографії повторюють до утворення текстового портрету [5].

Недоліками такого способу створення текстового портрету також є велика трудомісткість процесу розробки зображення із-за великої кількості операцій та складність підгонки літер, а особисто слів під елементи фотографії після спотворення текстових елементів командою «Спотворення оболонки по сітці», що може погіршувати якість остаточного зображення. Треба застосовувати дві програми Photoshop і Illustrator.

Розглянуті способи розробки типографічного портрету отримали найбільше розповсюдження, хоча і мають ряд недоліків, і можуть бути взяті як прототипи до їх удосконалення.

Мета статті – розробка ефективних способів створення типографічного портрету в редакторах растрової та векторної графіки, які дозволять знизити трудомісткість процесу розробки, спростити цей процес та підвищити якість зображення при проектуванні типографічного портрета.

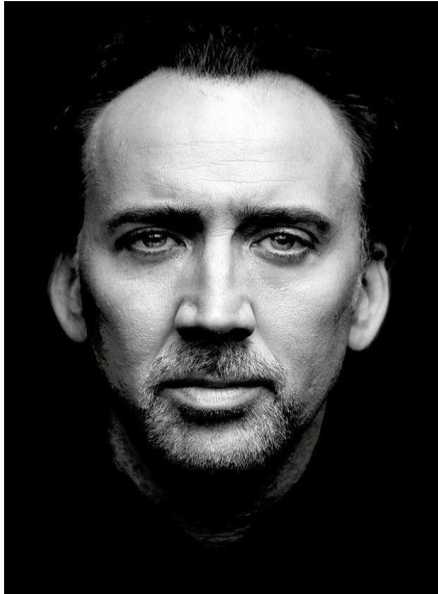
Виклад матеріалу. Для усунення недоліків по способу, що приведений в [2, с. 44–47], пропонується новий спосіб, технічним завданням якого є зменшення трудомісткості процесу створення типографічного портрету в Adobe Photoshop за рахунок зменшення використання кількості операцій та інструментів

Поставлене завдання досягається тим, що в пропонованому способі створення типографічного портрету, фотографію з портретом спочатку пастеризують в

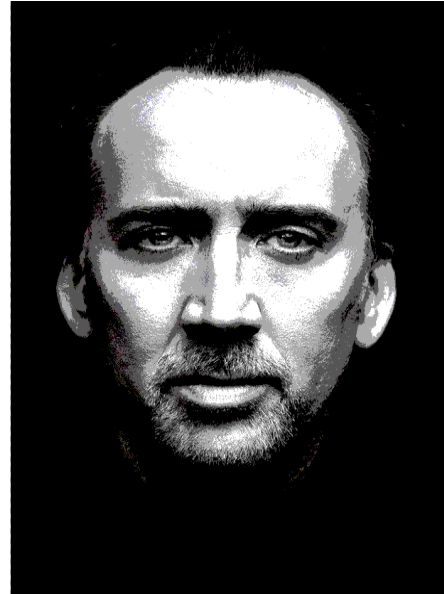
редакторі Adobe Photoshop командою «Пастеризація» для виділення кількох рівнів кольору зображення, а потім, по нижнім контурам кольорових рівнів, малюють лінії, які виконують роль шляху для написання літер, що утворюють типографічний портрет.

Для здійснення способу обирають контрастну фотографію (рис. 1, а), завантажують її у редактор Adobe Photoshop

і командою «Пастеризація» утворюють 3–6 кольорних рівнів (розкид кольорів, рис. 1, б). Потім інструментом «Перо» (Pen), по черзі, малюють криві лінії 1–3 (рис. 2, а), які розташовують по контурам рівнів пастеризації відповідно до рис портрету. Ці лінії виконують роль шляху, за яким інструментом «Текст» (Text) наносять текст із літер, що утворює типографічний портрет (рис. 2, б).

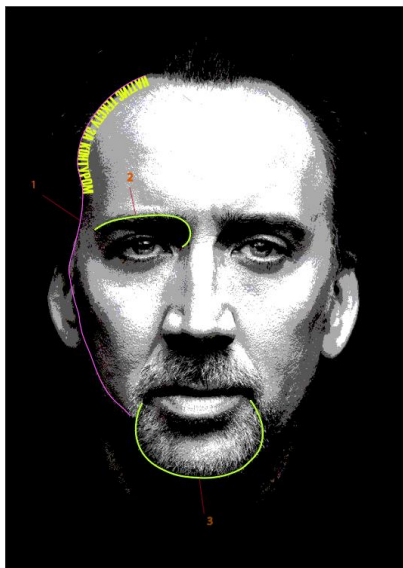


а



б

Рис. 1. Фотографія відомого актора Ніколаса Кейджа [6]: а – до обробки в Adobe Photoshop; б – після обробки командою «Пастеризація»



а



б

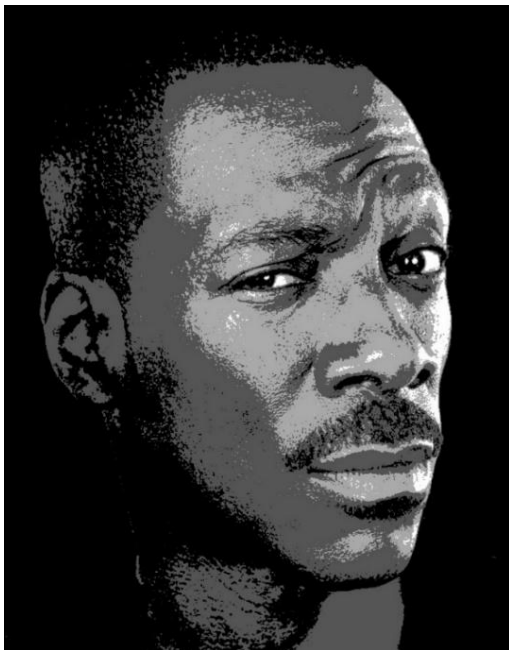
Рис. 2. Послідовність розробки типографічного портрету: а – нанесення на фото контурних ліній, що утворюють шлях для написання тексту; б – типографічний портрет, розроблений запропонованим способом

Таким чином, запропонований спосіб створення типографічного портрету в порівнянні із способом, прийнятим за прототип [2, с. 44–47], дозволяє виключити використання фільтрів «Контурна різкість» (Unsharp Mask), «Окреслені краї» (Poster Ages), «Аплікація» (Cutout) та команду «Мікшування каналів», а також потребу в створенні додаткових шарів, що приводить до зниження трудомісткості процесу створення типографічного портрету.

Для усунення недоліків по способу, що приведений в [5], пропонується новий спосіб, технічним завданням якого є зменшення трудомісткості процесу створення текстового портрету в графічному редакторі Adobe Illustrator, спрощення цього процесу та підвищення якості остаточного зображення за рахунок перетворення тексту в криві для трансформації літер відповідно

контурів фотографії.

Поставлене завдання досягається тим, що в запропонованому способі створення текстового портрету, обрану фотографію одразу завантажують в Adobe Illustrator та обробляють фільтром «Імітація→Аплікація» для утворення декількох кольорних рівнів на растровому зображенні (рис. 3), потім кожний з цих кольорних рівнів обводять по зовнішнім границям інструментом «Кривизна» для утворення ідентичних замкнутих векторних контурів, які потім заповнюють літерами, попередньо перетворивши літери в криві для можливості трансформації по внутрішнім границям замкнутих векторних контурів, при цьому, літерам, якими заповнюють той чи інший контур, задають колір цього контуру.



а



б

Рис. 3. Фотографія відомого актора Едді Мерфі [7]: а – зображена фотографія портрету після обробки в Adobe Illustrator фільтром «Імітація→Аплікація»; б – векторне зображення портрету, намальоване за кольорними контурами фотографії з використанням інструменту «Кривизна» в Adobe Illustrator

Для здійснення запропонованого способу обирають контрастну фотографію, завантажують її у редактор Adobe Illustrator і фільтром «Імітація→Аплікація» утворюють 6–8 кольорних рівнів на растровому зображенні (рис. 3, а). Потім,

кольорні рівні растрового зображення обводять інструментом «Кривизна», створюючи ідентичні замкнуті векторні контури, які заливають відповідними кольорами, що дозволяє створити векторний портрет (рис. 3, б).

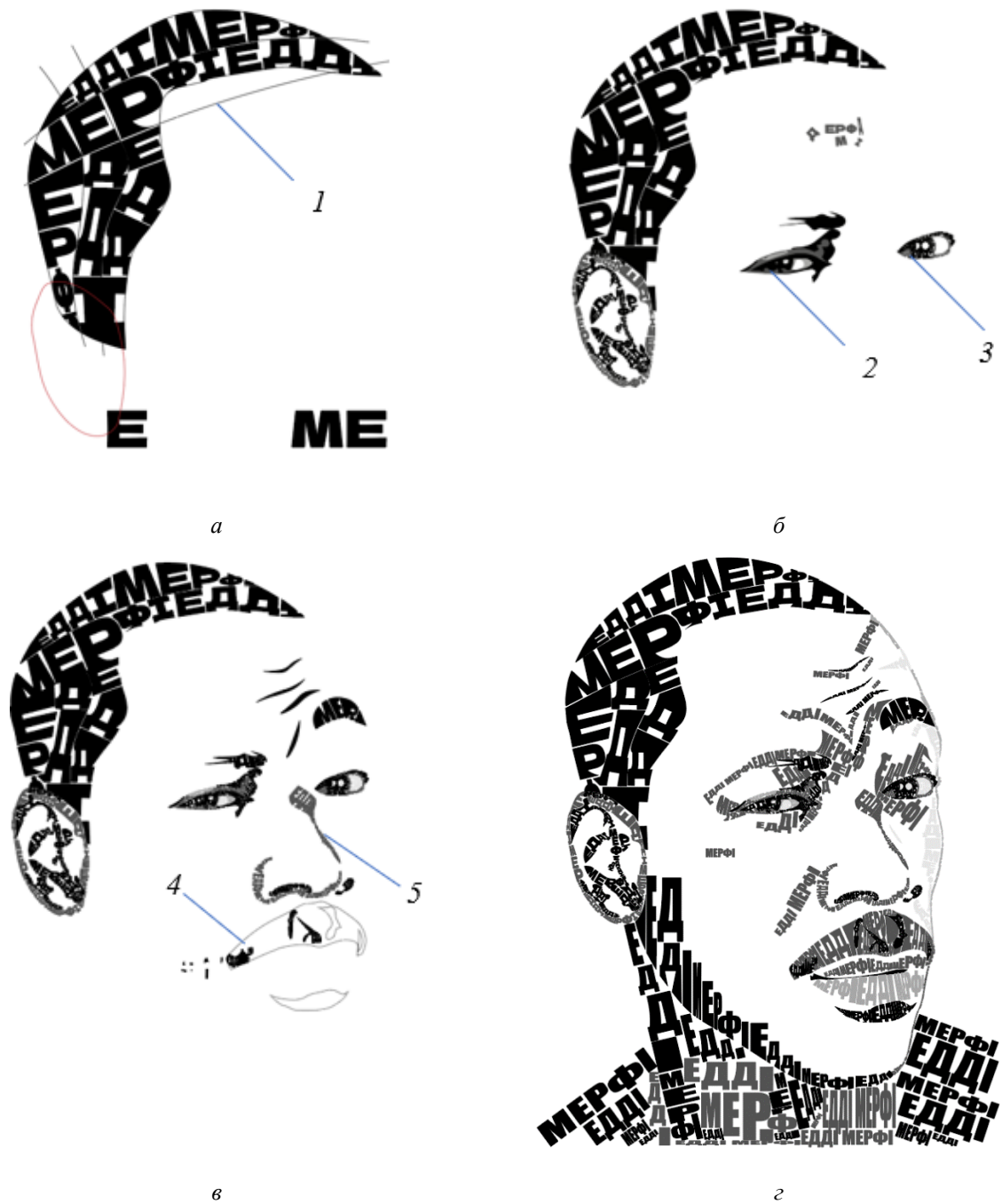


Рис. 4. Послідовність розробки типографічного портрету в редакторі векторної графіки Adobe Illustrator:
 а – додавання напрямних ліній до креслення для створення додаткових векторних контурів;
 б, в – заповнення векторних контурів буквами шляхом їх перетворення;
 г – текстовий портрет, виконаний за запропонованим способом

Якщо у векторному портреті є великі контури, наприклад, ті що відображають волосся, то їх можна поділити (на власний розсуд) додатковими лініями 1 (рис. 4, а) на ряд контурів, що дозволить заповнювати такі контури літерами меншого розміру.

Після того, як всі контури будуть намальовані, вибирають потрібний шрифт і інструментом «Текст» роблять довільно

бажаний напис, наприклад, «ЕДДІ МЕРФІ», цей текст перетворюють в криві, розгруповують і отримані окремі літери переміщують в утворені раніше контури зображення, розміщуючи їх по внутрішнім границям контурів за рахунок трансформації (рис. 4, а). Після того як контур заповнений літерами, його можна видалити, а літерам задати колір вибраного контуру. Далі

приступають до заповнення літерами інших контурів 2, 3 (рис. 4, б) і 4, 5 (рис. 4, в) і так до тих пір, поки не утвориться текстовий портрет (рис. 4, з).

Таким чином, запропонований спосіб створення типографічного портрету в графічному редакторі Adobe Illustrator, у порівнянні із способом прийнятим за прототип [5], дозволяє знизити трудомісткість процесу створення зображення, спростити цей процес та підвищити якість остаточного зображення за рахунок перетворення тексту в криві, що дозволяє точно і швидко трансформувати літери відповідно контурам фотографії.

Висновки

Проведені дослідження показали, що основними процесами розробки типографічного портрету в редакторах растрової та векторної графіки є: попередня обробка фотографії для формування чітких колірних контурів портрета; підбір і трансформація шрифтів для можливості підлаштовувати їх під колірні контури портрета; розташування перетворених літер або слів по колірним контурам портрету. Всі ці процеси впливають на трудомісткість робіт, їх складність та якість проектного зображення.

Велика кількість інструментів, шарів і команд, що використовуються при обробці растрового зображення портрета (фото), завжди ускладнює процес проектування, вимагає більше часу на обробку і робить його трудомістким.

Шрифт, який використовується при розробці візуального образу типографічного портрета, повинен максимально відповідати характеру композиції, для цього його потрібно трансформувати. У той же час процес підгонки шрифтів під контури

портрета за рахунок його трансформації є найбільш трудомістким в роботі. У зв'язку з цим спосіб перетворення шрифтів і підгонки букв або слів під контури портрета впливає на трудомісткість роботи. Крім того, спосіб перетворення шрифту може обмежити границі підгонки літер, а особисто слів під контури проектного портрета, що може погіршувати його якість.

На якість створюваного зображення впливає спосіб заповнення контурів портрета шрифтами. При заповненні контурів текстом, який написаний по заданому шляху, виникає проблема з нанесенням букв на дрібних елементах або в зонах зміни напрямку написання тексту через наявність гострих кутів на шляху розташування тексту, що є причиною погіршення якості зображення.

З урахуванням всіх виявлених передумов, що є запорукою підвищення трудомісткості роботи, ускладнення процесу розробки і зниження якості зображення при проектуванні типографічного портрета, з метою зменшення вказаних негативних факторів, були запропоновані нові способи створення типографічного портрету в редакторі растрової графіки Adobe Photoshop і редакторі векторної графіки Adobe Illustrator.

Запропоновані способи розробки типографічного портрета були успішно впроваджені автором в навчальний процес в Українському гуманітарному інституті при підготовці студентів з дисципліни «Комп'ютерне дизайн-проектування» за спеціальністю 022 «Дизайн» спеціалізації «Графічний дизайн», що дало змогу підвищити якість навчання та покращити методичне забезпечення дисципліни.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шостачук Т., Піддубна О. Типографічний портрет як новий тип візуального образу постмодернізму. Актуальні проблеми сучасного дизайну : V Міжнар. наук.-практ. конф. Київ 6 КНУТД, 27 квітня 2023. С. 128–131.
2. Шостачук Т. В. Художня образність графіки постмодернізму та моделювання нових візуальних образів у графічному дизайні : монографія. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2023. 155 с.
3. Свірко В. О., Рубцов А. Л., Чемакіна О. В., Кузьмін О. В. Стандартизація в дизайнерській діяльності : навч. посіб. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2020. 232 с.

4. Mavroudis J. Typographic portraits. 2024. URL: <https://www.zenpop.com/typographic-portraits> (дата звернення 06.12.2024).
5. Perhiniak M. Design a cool Typography Portrait in Adobe Illustrator. URL: <https://www.macprovideo.com/article/photoshop/design-a-cool-typography-portrait-in-adobe-illustrator> (дата звернення 06.12.2024).
6. Nicolas Cage. URL: <https://www.pinterest.com/pin/1477812371987304/> (дата звернення: 06.12.2024).
7. Eddie Murphy. URL: <https://www.pinterest.com/pin/351912465434497/> (дата звернення: 06.12.2024).

REFERENCES

1. Shostachuk T. and Piddubna O. *Typografichniy portret yak novyi typ vizualnoho obrazu postmodernizmu* [Typographic portrait as a new type of visual image of postmodernism]. *Aktualni problemy suchasnoho dyzainu : V Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia* [Actual Problems of Modern Design : V International scientific and practical conference]. Kyiv : KNUVD Publ., 27 April, 2023, pp. 128–131. (in Ukrainian).
2. Shostachuk T.V. *Khudozhnia obraznist hrafiky postmodernizmu ta modeliuvannia novykh vizualnykh obraziv u hrafichnomu dyzaini: monohrafiia* [Artistic imagery of postmodernism graphics and modeling of new visual images in graphic design: monograph]. Zhytomyr : ZhDU im. I. Franka Publ., 2023, 155 p. (in Ukrainian).
3. Svirko V.O., Rubtsov A.L., Chemakina O.V. and Kuzmin O.V. *Standartyzatsiya v dyzayners'kiy diyal'nosti : navchal'nyy posibnyk* [Standardization in design activity : a study guide]. Kherson : OLDI-PLUS publ., 2020, 232 p. (in Ukrainian).
4. Mavroudis J. Typographic portraits. 2024. URL: <https://www.zenpop.com/typographic-portraits> (accessed on 06.12.2024).
5. Perhiniak M. Design a cool Typography Portrait in Adobe Illustrator. URL: <https://www.macprovideo.com/article/photoshop/design-a-cool-typography-portrait-in-adobe-illustrator> (accessed on 06.12.2024).
6. Nicolas Cage. URL: <https://www.pinterest.com/pin/1477812371987304/> (accessed on 06.12.2024).
7. Eddie Murphy. URL: <https://www.pinterest.com/pin/351912465434497/> (accessed on 06.12.2024).

Надійшла до редакції: 15.12.2024.

УДК 614.8

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.89.1133

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ТРАВМУВАННЯ ПРАЦЮЮЧИХ НА БУДІВНИЦТВІ

ГЛАДЮК О. М.¹, *асп.*,

БОЛІБРУХ Б. В.^{2*}, *докт. техн. наук, проф.*,

СТОРОНСЬКИЙ М. О.³, *студ. магістратури*

¹ Кафедра управління гірничим виробництвом і охорони праці, ДВНЗ «Донецький Національний технічний університет», вул. Потебні, 56, 43003, Луцьк, Україна, тел. +38 (096) 989-91-77, e-mail: olesgladuk@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-6897-0283

^{2*} Кафедра цивільної безпеки, НУ «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна, тел. +38 (067) 672-78-01, e-mail: prof.bolibrukh@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9879-7454

³ НУ «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна, тел. +38 (068) 310-52-29, e-mail: storonskiymyhailo@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-9208-9926

Анотація. Постановка проблеми. Щороку у світі відбувається близько 60 000 смертельних випадків на будівництві, що дорівнює одному нещасному випадку, що трапляється кожні дев'ять хвилин. В контексті аналізу статистичних показників травмування працюючих встановлено систематичне збільшення кількості нещасних випадків на будівельних майданчиках. **Мета статті** – дослідження причин виробничого травматизму та проблем причинно-наслідкового його характеру на об'єктах будівництва з метою розробки засад удосконалення регламенту виконання робіт. **Висновки.** Аналіз виробничого травматизму в будівельній галузі засвідчує найбільший показник нещасних випадків та випадків зі смертельними наслідками. Необхідно зазначити, що кількість нещасних випадків на будівництві з втратою працездатності зростає з настанням осінньо-зимового періоду. В результаті дослідження показників травмування встановлено, що травмування під час виконання робіт на будівництві отримували певні категорії працівників, а саме: муляри, штукатури, підсобники, армувальники. В результаті дослідження встановлені основні фактори, які впливають на кількісні показники нещасних випадків на будівництві та залежності фізіологічного статусу працюючого від дії низьких температур. Також досліджено проблеми захисних властивостей засобів індивідуального захисту працюючих на будівництві. Формування комплексу засобів індивідуального захисту потребує наукового обґрунтування. В контексті дії температури навколишнього середовища та різної інтенсивності виконання робіт постає завдання вибору оптимального комплексу засобів індивідуального захисту. Приймаючи до уваги особливості функціонального навантаження працюючих, обґрунтовано доцільність досліджувати фізіологічний статус кожної категорії працівників за різної інтенсивності навантажень в діапазоні 200–420 Вт. Застосування прогнозованої методології дослідження захисних властивостей засобів індивідуального захисту та їх впливу на фізіологічний стан працюючих в динамічних умовах формує потребу удосконалення регламенту виконання робіт.

Ключові слова: будівництво; виробничий травматизм; аналіз нещасних випадків; причини нещасних випадків; регламент

RESEARCH OF THE CAUSES OF INJURIES TO CONSTRUCTION WORKERS

HLADIUK O.M.¹ *Postgrad. Stud.*,

BOLIBRUKH B.V.^{2*} *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

STORONSKYI M.O.³ *Stud.*

¹ Department of Mining Management and Labor Protection, Donetsk National Technical University, 56, Str. Potebny, Lutsk, 43003, Ukraine, tel. +38 (096) 989-91-77, e-mail: olesgladuk@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-6897-0283

^{2*} Department of Civil Security, Lviv Polytechnic University, 12, Str. S. Bandery, Lviv, 79013, Ukraine, tel. +38 (067) 672-78-01, e-mail: prof.bolibrukh@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9879-7454

³ Lviv Polytechnic University, 12, Str. S. Bandery, Lviv, 79013, Ukraine, tel. +38 (068) 310-52-29, e-mail: storonskiymyhailo@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-9208-9926

Abstract. Statement of the problem. There are around 60,000 construction fatalities worldwide each year, which equates to one accident every nine minutes. In the context of the analysis of statistical indicators of injury to workers, a systematic increase in the number of accidents at construction sites was established. **The purpose of the article** is to study the causes of industrial injuries and the problems of their cause-and-effect nature at construction sites in order to develop the principles of improving the work performance regulations. **Conclusions.** Analysis of industrial injuries in the construction industry confirms the highest rate of accidents and fatal cases consequences. It should be noted that the number of construction accidents with loss of working capacity increases with the onset of the autumn-winter period. As a result of the study of injury indicators, it was established that certain categories of workers were injured during construction work, namely: masons, plasterers, helpers, reinforcement workers. As a result of the study, the main factors affecting the quantitative indicators of construction accidents and the dependence of the worker's physiological status on the effect of low temperatures were established. The problems of the protective properties of personal protective equipment for construction workers have also been investigated. Formation of a set of personal protective equipment requires scientific justification. In the context of environmental temperature and different work intensity, the task of choosing the optimal set of personal protective equipment arises. Taking into account the peculiarities of the functional load of workers, the expediency of investigating the physiological status of each category of workers under different intensity of loads in the range of 200–420 W is substantiated. The application of the predicted methodology for the study of the protective properties of personal protective equipment and their impact on the physiological state of workers in dynamic conditions creates the need to improve work performance regulations.

Keywords: *construction; industrial injuries; accident analysis; causes of accidents; regulation*

Постановка проблеми. Забезпечення безпечних умов праці та запровадження превентивних заходів щодо промислової безпеки є безпосереднім та основним обов'язком роботодавця. Незважаючи на систематичне удосконалення системи управління охороною праці (СУОПР) на підприємствах та організаціях, незалежно від форм власності, статистичні показники травмування працюючих залишаються неприйнятними і викликають занепокоєння. Особливо це стосується галузі будівництва. Щороку у світі відбувається близько 60 000 смертельних випадків на будівництві, що дорівнює одному нещасному випадку, що трапляється кожні дев'ять хвилин. Крім того, у будівельній галузі зайнято майже 10 % робочої сили, але на неї припадає 20–40 % нещасних випадків зі смертельними наслідками на виробництві. [1; 2].

Крім того, Fang T. стверджував, що небезпечна поведінка працівників була визнана прямою та поширеною причиною нещасних випадків на будівництві. Оскільки характеристики будівельних робіт визначають, що робітники зазвичай працюють на окремих ділянках, така

децентралізація ускладнює виявлення та управління небезпечною поведінкою [3].

Окрім зазначеного, за статистичними опрацюваннями нещасних випадків на будівництві Державною службою з питань праці встановлені причини травмування, а саме: пригоди (події) під час руху транспортних засобів, падіння потерпілого, ураження електричним струмом, дія температур, показники важкості праці, показники напруженості праці [4].

Актуальність дослідження підтверджується незмінним показником дії температур на стан працюючого. Відсутність чіткого регламенту щоденного допуску до роботи і, особливо, за умов дії низьких температур та робіт на висоті визначає вектор досліджень та обумовлює необхідність розробки превентивних заходів запобігання травмування працюючих на будівництві.

Аналіз публікацій. В роботах [4; 5] висвітлено кількісні показники нещасних випадків на виробництві (рис. 1–3). З аналізу показників травмування працюючих встановлено, що за кількістю отриманих травм, галузь будівництва посідає друге місце.

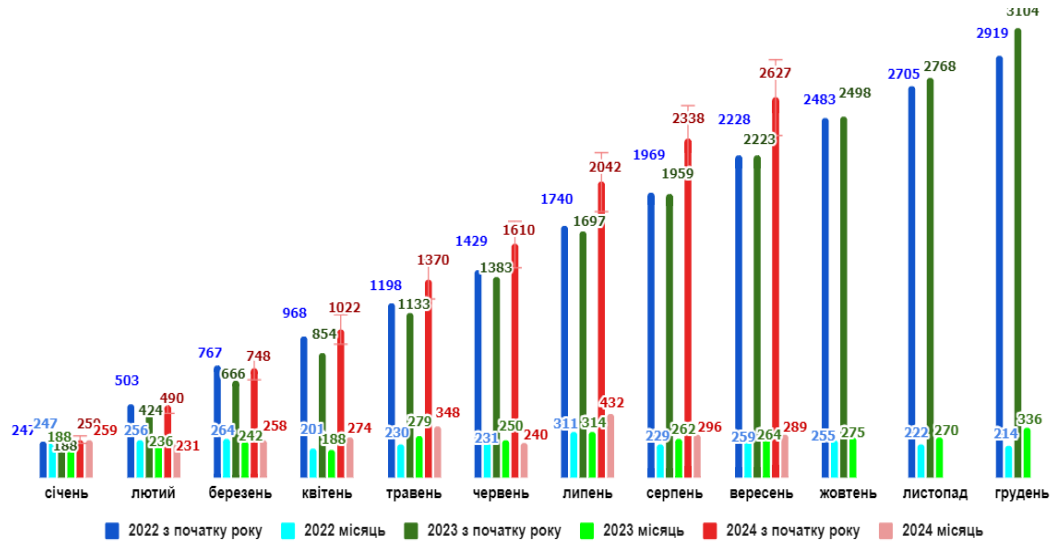


Рис. 1. Стан виробничого травматизму в Україні у 2022–2024 рр. (кількість осіб)

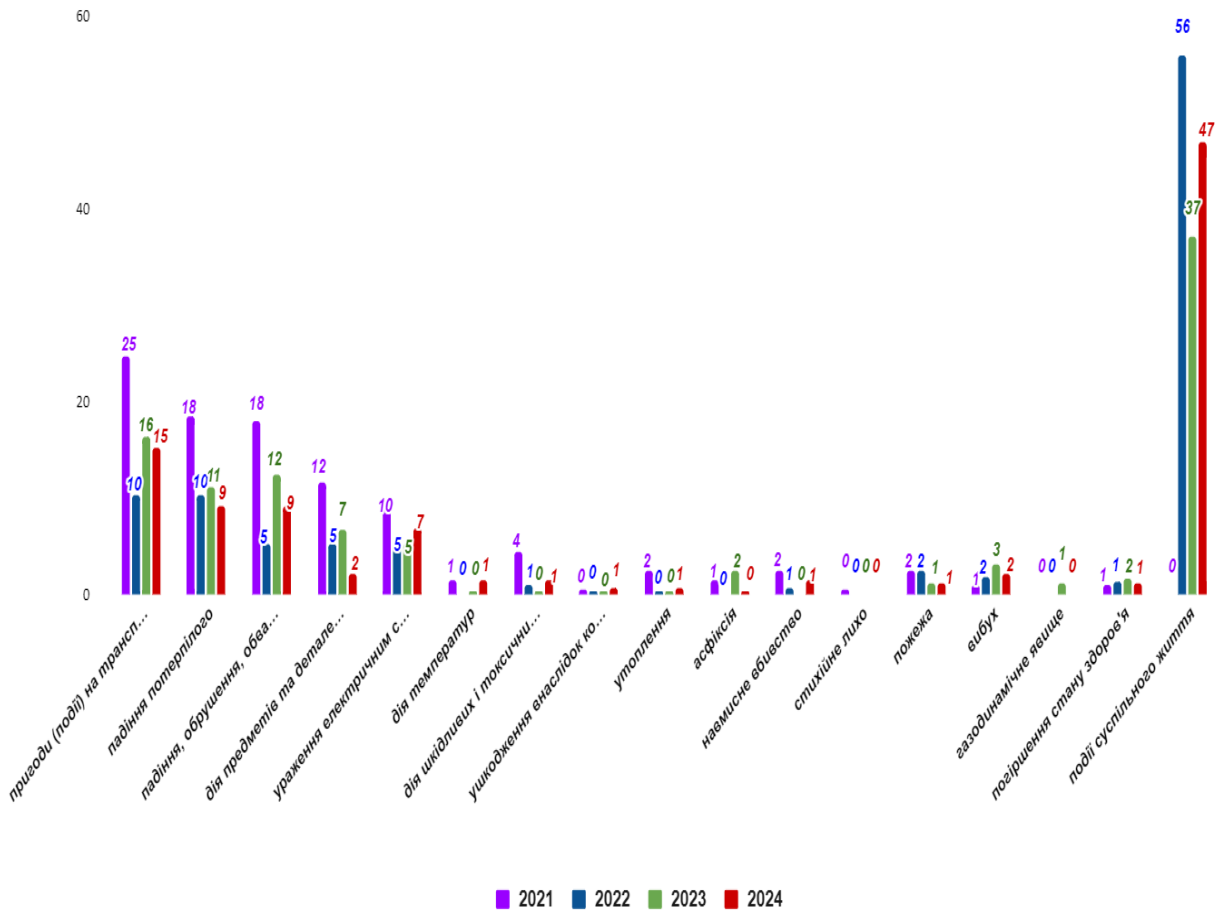


Рис. 2. Динаміка подій, що призвели до нещасних випадків зі смертельним наслідком за 7 місяців 2021–2024 рр. (% від загальної кількості загиблих)

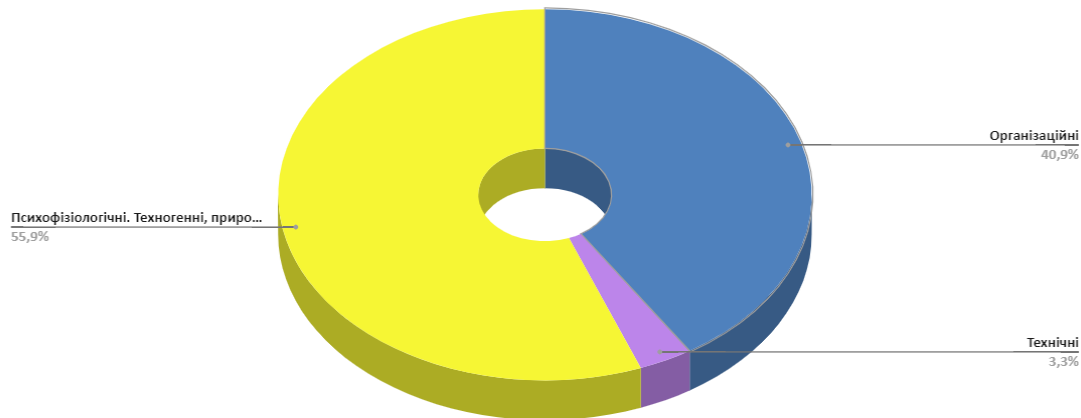


Рис. 3. Причини нещасних випадків зі смертельним наслідком, пов'язані з виробництвом за 9 місяців 2024 року

Надзвичайно інформативним є рисунок 3, де зазначено, що найбільшу частку причин нещасних випадків складають психофізіологічні – 55,9 %. На другому місці – організаційні.

Ймовірність отримати травму зростає із збільшенням ступеня інформаційної невизначеності щодо небезпек, пов'язаних із технологічним обладнанням й процесами, функціонуванням системи управління охороною праці, а також психофізіологічним станом працівника зазначили автори. В роботі [6] зазначено, що ризики травмування за умов інформаційної невизначеності можуть бути виражені через ентропію за формулою К. Шеннона, за кожною групою причин:

$$H(X) = \sum_{i=1}^N p(X_i) \log_a p(X_i), \quad (1)$$

де pX_i – ймовірність настання небажаного наслідку у вигляді травмування працівника внаслідок браку інформації для прийняття управлінського рішення щодо попередження виробничого травматизму за i -ю групою причин; a – основа логарифму, що обирається залежно від кількості можливих станів (у даному випадку розглядаються два стани: отримання чи неотримання травми працівником на робочому місці).

В роботах [7; 8] детально описується безпосередня залежність адекватності поведінки від дії низьких температур на

працюючого. Аналогічні висновки зроблено авторами в дослідженнях [9–11], де досліджувалися характерні зміни психофізіологічного стану працюючих в умовах дії різних температур та навантажень.

У 2023 році в будівельній галузі зафіксовано значну кількість нещасних випадків зі смертельними наслідками або серйозними травмами. Основними категоріями працівників, які постраждали, є будівельники, муляри, працівники висотних робіт і слюсарі, особливо ті, хто працює в умовах підвищеного ризику, таких як зведення багатоповерхівок або ремонт підірних стін. Травми часто виникають через падіння з висоти, зсуви ґрунту або порушення правил особистої безпеки.

Найбільш поширеними причинами нещасних випадків є організаційні порушення, зокрема відсутність захисних огорож і колективних засобів захисту. Наприклад, у випадках на будівництві працівники часто отримували травми через недотримання вимог безпеки, таких як незахищені шахти ліфтів або відсутність засобів індивідуального захисту. У світовій статистиці також спостерігається тенденція до високої частки смертей і травм серед будівельних робітників, зокрема через небезпеку падіння та аварії на будівельних майданчиках.

Мета статті – визначення пріоритетних напрямків дослідження щодо причин

виробничого травматизму в галузі будівництва.

Результати дослідження. В результаті опрацювання статистичних показників травматизму в галузі будівництва за період з 2020 по липень 2024 років встановлено два домінуючих фактори безпосереднього впливу на створення передумов випадків нещасних випадків з травмування працюючих на будівництві, а саме: температурні та організаційні чинники. І вони складають 25 та 55 % відповідно від загальної кількості травмувань. Наступним

фактором впливу є період року, а саме осінньо-зимовий, під час якого сталися понад 70 % нещасних випадків в будівельній галузі. З огляду на зазначені чинники, виникає логічне обґрунтування щодо створення причинно-наслідкової підсистеми послідовності «температура – гіпотермія – гіпоксія – зниження рівня когнітивних функцій» в системі «виробниче середовище-працюючий».

Блок-схему управління системою «виробниче середовище-працюючий» представлено на рисунку 4.

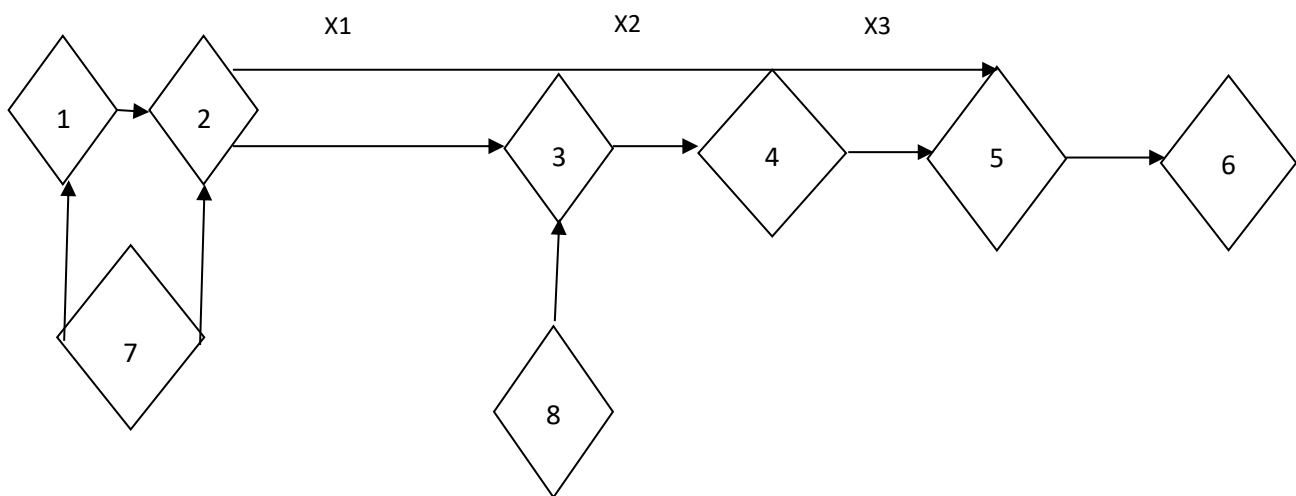


Рис. 4. Блок-схема управління системою «виробниче середовище-працюючий»: 1 – засоби праці; 2 – об'єкт реагування; 3 – засоби індивідуального захисту; 4 – працюючий; 5 – травматизм, професійне захворювання; 6 – управління об'єктом і засобами праці (спорядження, техніка, засоби малої механізації); 7 – управління рівнем впливу НШФ за допомогою застосування засобів індивідуального захисту; 8 – система керуючих впливів; x_1 – небезпечні і шкідливі фактори виробничого середовища; x_2 – залишковий вплив після дії низьких температур; x_3 – залишкові рівні НШВФ після застосування ЗІЗ

Представлена на рисунку 4 блок-схема визначає складові управління системою «виробниче середовище-працюючий», а саме: засоби праці; об'єкт реагування; засоби індивідуального захисту; працюючий; травматизм, професійне захворювання; управління об'єктом і засобами праці (спорядження, техніка, засоби малої механізації); управління рівнем впливу небезпечних та шкідливих факторів (НШФ) за допомогою застосування засобів індивідуального захисту; система керуючих впливів. Особливої уваги заслуговують фактори, які є базовими щодо визначення рівня ризику отримання травм та професійного захворювання. Ці фактори

позначені як x_1 , x_2 , x_3 : небезпечні і шкідливі фактори виробничого середовища; залишковий вплив після дії низьких температур; залишкові рівні НШВФ після застосування ЗІЗ. Кількість нещасних випадків на будівництві може змінюватися в залежності від пори року через різні погодні умови та специфіки будівельних робіт. У зимовий період кількість нещасних випадків значно збільшується через слизькі поверхні, обмерзання конструкцій, а також скорочений світловий день, що ускладнює видимість. Переохолодження і робота у важких умовах також сприяють ризику травм через гіпотермію.

Зниження травматизму спостерігається в період літніх місяців, що зазвичай характеризуються меншим ризиком впливу погодних факторів. Однак, спека може викликати фізичне виснаження працівників і призводити до порушень правил безпеки. Основні ризики: теплові удари, втома, падіння через втрату концентрації, зневоднення. Період осінніх робіт також характеризується зростанням кількості нещасних випадків. Це особливо актуально для завершальних етапів будівельних робіт перед зимою. Основні ризики: падіння через мокрі поверхні, нестійкі конструкції, порушення при роботі на висоті через вітер. Загалом найбільш небезпечними є зимовий і осінній періоди через погодні умови, що створюють додаткові ризики на будівельних майданчиках. Теплове відчуття людини в основному пов'язане з тепловим балансом її тіла в цілому. Цей баланс залежить від фізичної активності та одягу, а також параметрів навколишнього середовища: температури повітря, середньої температури випромінювання, швидкості руху і вологості повітря.

Таким чином, приймаючи до уваги основні фактори дії на працюючого можна сформулювати базові чинники дослідження причин травмування, професійного захворювання в результаті системного перебування працюючого в стані гіпотермії. При оцінюванні або вимірюванні цих факторів можливо передбачити теплове відчуття для організму в цілому шляхом обчислення середньої оцінки (PMV).

Встановлення відсотка незадоволених (PPD) визначає індекс, що містить інформацію про тепловий дискомфорт або теплове невдоволення відсотка людей, які ймовірно відчувають себе занадто тепло або дуже холодно в даному середовищі. PPD можуть бути отримані з PMV.

Тепловий дискомфорт може також бути викликаний небажаним місцевим охолодженням або нагріванням тіла. Найбільш поширеними місцевими факторами дискомфорту є температура випромінювання асиметрії (холодної або теплої поверхні), протяг (який визначається як місцеве охолодження тіла, викликане

рухом повітря), вертикальний перепад температури повітря і холодні або теплі підлоги.

Стандарт ISO 11079 [12] визначає ізоляцію від холоду погодні ансамблі, необхідні для підтримки теплового балансу для різних умов навколишнього середовища та інтенсивності роботи надає обмежені вказівки щодо оцінки кінцівок охолодження. Інший стандарт, ASTM F2732-16 [13], передбачає температурний рейтинг для комфортного використання на двох рівнях активності прості моделі втрати тепла всім тілом. Однак ISO 11079 і ASTM F2732-16 цього не надають інформацію щодо необхідної ізоляції для кінцівок (руки і ноги) для їх захисту. Крім того, первинний вихід для IREQ і ASTM F2732-16 – значення ізоляції одягу (термічний опір) і значення температури відповідно, користувачам важко інтерпретувати ці значення і застосувати в розумні рішення щодо вибору одягу, тривалість безпечного впливу або потенційні ризики холодних травм. Існує два способи комплектування одягу для захисту від низьких температур навколишнього середовища, які визначені стандартами, а саме: оцінка, ISO 11079 та ASTM F2732-16. Методи, в зазначених нормах, обмежені та надають неповні рекомендації щодо визначення предметів одягу для запобігання холодним травмам. Відповідно до виконання робіт різного фізичного навантаження мають залежності фізіологічні стани працюючих на будівельних майданчиках під час дії низьких температур навколишнього середовища.

Бракує досліджень щодо дистанційного моніторингу для підвищення безпеки та здоров'я будівельників. У статті представлено новий підхід до моніторингу ергономічно безпечної та небезпечної поведінки будівельників. Дослідження ґрунтується на методології, яка використовує об'єднання даних безперервного дистанційного моніторингу місцезнаходження та фізіологічного стану будівельників. Для моніторингу діяльності будівельників вбачаємо доцільність

впровадження технології неінтрузивного визначення місцезнаходження працівників у режимі реального часу (RTLS) та моніторингу фізіологічного статусу (PSM).

Об'єднання даних можна визначати як процес системного моніторингу та інформації з багатьох різнорідних джерел для отримання розширеного висновку про фізіологічний стан працюючого.

Формально, для оцінки ступеня фізіологічного статусу працюючого в умовах дії низьких температур – K_{ij} (по i -ій властивості на рівні j) доречно застосувати відносні показники, що представляють собою функцію двох абсолютних показників – вимірюваного P_{ij} і прийнятого за базовий $P_{ij_{баз}}$ та, обов'язковий коефіцієнт когнітивних здатностей & за певних умов – температура дії, інтенсивність навантаження та час:

$$K_{ij} = f(P_{ij}; P_{ij_{баз}}) \& . \quad (2)$$

На відміну від P_{ij} , яка є величиною постійною, $P_{ij_{баз}}$ залежить не тільки від самих властивостей ЗІЗ, але й від комфортної температури підкостюмного простору, теплоізоляційних характеристик матеріалів захисного одягу, взуття, засобу захисту голови. Достовірна оцінка захисних властивостей K_{ij} від впливу на працюючого виробничого фактора безпосередньо залежить від обраної бази для порівняння показників $P_{ij_{баз}}$.

На підставі зазначеного впливає, що оцінка фізіологічного статусу працюючого в цілому неможлива без обчислення показників елементарних захисних властивостей ЗІЗ. Безпосередне

узагальнення набору показників, що характеризують проблематичне, оскільки вони мають різну розмірність, у зв'язку з чим, необхідно на єдиній методологічній основі перевести всі прості властивості шкал з різними розмірностями у безрозмірну шкалу, що носить назву трансформації шкал.

В контексті зазначеного, постає справедлива вимога до формування науково обґрунтованого регламенту вибору комплектації ЗІЗ та проведення робіт, залежно від теплоізоляційних характеристик захисних засобів, інтенсивності виконання робіт та часу дії низьких температур.

Висновки

В результаті досліджень встановлено, що для підвищення безпеки та здоров'я праці в будівельній галузі бракує дистанційного моніторингу за станом працюючого. У статті представлено новий підхід до моніторингу ергономічне безпечної та небезпечної поведінки будівельників. Дослідження ґрунтується на методології, яка використовує об'єднання даних безперервного дистанційного моніторингу місцезнаходження та фізіологічного стану будівельників. Результати цього дослідження свідчать про формування нового підходу та регламенту щодо автоматизації дистанційного моніторингу виконання техніки безпеки будівельників шляхом об'єднання даних про їх місцезнаходження, фізичне навантаження, оцінці захисних властивостей ЗІЗ, часу дії низьких температур.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Amir Reza Kari Azari, Neda Mousavi, S. Farid Mousavi, Seyed Bagher Hosseini. Risk assessment model selection in construction industry. *Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 38, iss. 8. Pp. 9105–9111.
2. Fang T. A New Perspective on Culture. *Management and Organization Review*. 2012. № 8. Pp. 25–50.
3. Оперативна інформація. Державна служба України з питань праці. URL: <https://dsp.gov.ua/operativna-informatsiia/> (дата звернення: 05.07.2024).
4. Оперативні дані про нещасні випадки зі смертельним наслідком та групові нещасні випадки, пов'язані з виробництвом, зареєстровані Держпраці. URL: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1nurNVy_10NOqJ9GujloAhnkRNG3vSGoZoLGYgeTw-O4/edit?gid=1228031954#gid=1228031954 (дата звернення: 05.07.2024).
5. Хевеніт Г., Бродє П., Хартог Е., Кукланє К., Холмер І., Россі Р. М., Річардс М., Фарнворт Б., Ван Х. Випарне охолодження : ефективна прихована теплота випаровування з різницею випаровування від шкіри. *Журнал прикладної фізіології*. 2013. № 114 (6). С. 778–785.

6. Castellani Дж., Савка М., Дегрут Д., Янг А. Реакції холодової терморегуляції після фізичної втоми. *Frontiers in bioscience (Scholar edition)*. 2010. № 2ю С. 854–865.
7. Xu X., Tikuisis P. Thermoregulatory modeling for cold stress. *Comprehensive Physiology*. 2014. № 4. С. 1–25.
8. Xu X., Rioux T. P., Gonzalez J. A., Hansen E. O., Castellani J. W., Santee W. R., Karis A. J., Potter A. W. Development of a cold injury prevention tool. *The Cold Weather Ensemble Decision*.
9. ДСТУ ISO/TR 11079-2002. Одяг. Визначення необхідних ізоляційних характеристик (ISO/TR 11079:1993, IDT) [з поправками (ІПС № 4-2003), (ІПС № 2-2003)].
10. ASTM F2732-16. Стандартна практика визначення номінальних температур для захисного одягу в холодну погоду.

REFERENCES

1. Amir Reza Kari Azari , Neda Mousavi , S. Farid Mousavi and Seyed Bagher Hosseini. Risk assessment model selection in construction industry. *Expert Systems with Applications*. 2011, vol. 38, iss. 8, pp. 9105–9111.
2. Fang T. A New Perspective on Culture. *Management and Organization Review*. 2012, no. 8, pp. 25–50.
3. *Operativna informatsiya. Derzhavna sluzhba Ukrainy z pytan' pratsi* [Operational information. State Labor Service of Ukraine]. URL: <https://dsp.gov.ua/operativna-informatsiia/> (accessed: 05.07.2024). (in Ukrainian).
4. *Operativni dani pro neshchasni wypadky zi smertel'nym naslidkom ta hrupovi neshchasni wypadky, pov'yazani z vyrobnytstvom, zareyestrovani Derzhpratsi* [Operational data on fatal accidents and group accidents related to production, registered by the State Labor Service]. URL: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1nurNVy_10NOqJ9GujloAhnkRNG3vSGoZoLGYgeTw-O4/edit?gid=1228031954#gid=1228031954 (accessed: 05.07.2024). (in Ukrainian).
5. Hevenit H., Brode P., Hartog E., Kuklane K., Holmer I., Rossi R.M., Richards M., Farnworth B. and Wang X. *Vyparne okholodzheniya : efektyvna prykhovana teplota vyparovuvannya z riznytseyu vyparovuvannya vid shkiry* [Evaporative cooling : effective latent heat of evaporation with skin evaporation difference]. *Zhurnal prykladnoyi fiziologii* [Journal of Applied Physiology]. 2013, no. 114 (6), pp. 778–785. (in Ukrainian).
6. Castellani J., Savka M., Degrut D. and Young A. *Reaktsiyi kholodovoyi termorehulyatsiyi pislya fizychnoyi vtomy* [Reactions of cold thermoregulation after physical fatigue]. *Frontiers in bioscience (Scholar edition)* [Frontiers in Bioscience (Scholar edition)]. 2010, no. 2, pp. 854–865. (in Ukrainian).
7. Xu X. and Tikuisis P. Thermoregulatory modeling for cold stress. *Comprehensive Physiology*. 2014, no. 4, pp. 1–25.
8. Xu X., Rioux T.P., Gonzalez J.A., Hansen E.O., Castellani J.W., Santee W.R., Karis A.J. and Potter A.W. Development of a cold injury prevention tool : the Cold Weather Ensemble Decision.
9. *DSTU ISO/TR 11079-2002. Odyah. Vyznachennya neobkhidnykh izolyatsiynykh kharakterystyk (ISO/TR 11079:1993, IDT). Z Popravkamy (IPS № 4-2003), (IPS № 2-2003)* [DSTU ISO/TR 11079-2002. Clothing. Determination of required insulation characteristics (ISO/TR 11079:1993, IDT). As amended (IPS No. 4-2003), (IPS No. 2-2003)]. (in Ukrainian).
10. *ASTM F2732-16. Standartna praktyka vyznachennya nominal'nykh temperatur dlya zakhysnoho odyahu v kholodnu pohodu* [ASTM F2732-16. Standard practice for determining nominal temperatures for cold weather protective clothing]. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.12.2024.

УДК 728.3:621.311

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.97.1134

АНАЛІЗ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ БУДІВНИЦТВА МАЛОПОВЕРХОВИХ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ З УРАХУВАННЯМ РАЦІОНАЛЬНОГО СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ

ЗАЙКО О. М.^{1*}, *асп.*,

ЗАЯЦЬ Є. 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 (056) 756-33-66, e-mail: alex.zayko@i.ua, ORCID ID: 0009-0007-9785-8036

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 (056) 756-33-66, e-mail: zei83dici@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7382-919X

Анотація. Постановка проблеми. Сектор малоповерхового житлового будівництва в Україні нині розвивається, що пов'язано з необхідністю забезпечити переміщених осіб доступним житлом. Це вимагає зниження собівартості будівництва, зокрема через скорочення витрат паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР). Після завершення війни потреба у відбудові житла значно зростає, що робить актуальним вибір раціональних організаційно-технологічних рішень із мінімальними енерговитратами для ефективного будівництва. **Мета статті.** Аналіз сучасних досліджень та нормативної бази щодо витрат паливно-енергетичних ресурсів у малоповерховому будівництві й постановка завдань для удосконалення організаційно-технологічних рішень з раціональним використанням енергоресурсів. **Висновки.** Використання енергозберігаючих технологій у житловому будівництві сприяє зменшенню витрат на енергоресурси в експлуатації. Однак етап спорудження залишається матеріало- та капіталомістким, вимагаючи значних витрат ПЕР для роботи техніки та організації майданчика. Результати дослідження можуть бути спрямовані на зниження витрат ПЕР у малоповерховому будівництві, що зменшить собівартість і підвищить доступність житла.

Ключові слова: *малоповерхове будівництво; механізація будівництва; енергозбереження; енергоефективність; організаційно-технологічні рішення; паливно-енергетичні ресурси*

ANALYSIS OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN LOW-RISE RESIDENTIAL CONSTRUCTION CONSIDERING RATIONAL ENERGY CONSUMPTION

ZAIKO O.M.^{1*}, *PhD Stud.*,

ZAIATS Yev.I.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

^{1*} Department of Organization and Management of Public Works, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: alez.zayko@i.ua, ORCID ID: 0009-0007-9785-8036

² Department of Organization and Management of Public Works, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: zei83dici@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7382-919

Abstract. Formulation of the Problem. The low-rise residential construction sector in Ukraine is experiencing rapid development, largely due to the growing demand for affordable housing to support displaced persons and families impacted by the ongoing conflict. This sector's expansion under current conditions emphasizes the necessity of reducing construction costs, particularly through efficient fuel and energy resource (FER) management during the building phase. Efficiently utilizing FER in construction is crucial for ensuring housing affordability while meeting the needs of reconstruction at scale. After the war, there will be an urgent and substantial need for large-scale housing reconstruction across hundreds of towns and villages, as well as in suburban and rural areas. This demand calls for rational organizational and technological solutions that emphasize minimal energy consumption and efficient use of construction resources. Consequently, strategies to optimize energy consumption in low-rise housing construction are

vital for future growth in the sector. **Purpose of the Article.** The article aims to analyze current research and regulatory frameworks concerning FER usage in low-rise construction and to establish objectives for refining organizational and technological solutions that support efficient FER consumption. The study examines energy-efficient practices in various construction technologies, such as SIP panels, lightweight modular structures, and prefab systems, and evaluates these methods in terms of minimizing FER usage. Special focus is placed on practices that increase the share of factory-ready elements, which decreases on-site construction time and equipment demand, leading to overall reductions in FER consumption during building assembly. **Conclusions.** The integration of energy-saving technologies in residential construction is instrumental in reducing FER costs, especially during building operation. However, the initial construction phase remains material- and capital-intensive, requiring significant FER input for equipment operation, site preparation, and construction activities. Given the planned expansion of low-rise residential housing, minimizing FER use through optimal organizational and technological methods is critical. The research findings can contribute to reducing FER costs in low-rise construction, which in turn decreases total project costs, enhances housing accessibility, and supports the sustainable development of residential infrastructure. The adoption of such methods is key to advancing efficient, affordable, and scalable housing solutions for the Ukrainian construction sector.

Keywords: *low-rise construction; construction mechanization; energy conservation; energy efficiency; organizational and technological solutions; fuel and energy resources*

Постановка проблеми. В даний час в умовах повномасштабного російського вторгнення сектор малоповерхового житлового будівництва знаходиться у стадії розвитку. Стала нагальною проблема забезпечення громадян країни, які втратили власні будинки або були тимчасово переміщені, доступним та комфортним житлом. У рамках цього передбачається всляке зниження його собівартості, що в першу чергу досягається зниженням собівартості будівництва, у тому числі за рахунок скорочення витрат паливно-енергетичних ресурсів (*далі* – ПЕР) у період спорудження будівель. Очікується, що після закінчення війни ця проблема набуде масового характеру, бо буде необхідно наново відбудувувати сотні, а може і тисячі сіл та невеликих містечок. Тому вибір раціональних організаційно-технологічних рішень для спорудження малоповерхових житлових будівель з мінімальними енерговитратами, із застосуванням методів моделювання організаційно-технологічних процесів та їх удосконалення в частині ресурсного забезпечення, є актуальним для будівельної галузі.

Мета статті – аналіз сучасних досліджень в області малоповерхового будівництва та нормативної бази, яка регулює витрати паливних та енергетичних ресурсів усіма видами енергоспоживачів на всіх стадіях спорудження комплексу малоповерхових житлових будівель, та постановка завдань дослідження відносно

удосконалення організаційно-технологічних рішень спорудження малоповерхових житлових будівель з урахуванням раціонального використання енергоресурсів.

Аналіз публікацій. Проблема раціонального використання енергоресурсів постала перед нашою країною не сьогодні, і з часом, вона лише загострюється. Високий рівень залежності України від імпортованих енергетичних ресурсів і постійне зростання їх вартості, суттєво впливають на конкурентоспроможність національної економіки. Відчуваючи економічні втрати від зростання вартості енергоресурсів, великі підприємства і компанії активно здійснюють заходи для впровадження новітніх енергоефективних технологій, що підвищують рівень енергоефективності.

Розвиток малоповерхового будівництва в Україні визначено низкою нормативно-правових актів та державних програм. До них відносяться програма «Житло» та її підпрограми, Національний проект «Доступне та комфортне житло» та ін.

За останні 20 років частка побудованого малоповерхового житла в Україні збільшилася більш ніж у 7 разів. В останні роки на малоповерхові будівлі стабільно припадає половина житлової площі, що вводиться в експлуатацію, а в 1990 р. вона становила трохи більше 6 % [1]. Одним з перспективних напрямків розвитку малоповерхового домобудівництва є будівництво швидкокомтованих будівель. Назва «швидкокомтовані» для будівель

носить дискусійний характер. Як правило, це будівлі високої заводської готовності, терміни будівництва яких менші у порівнянні з нормативами спорудження об'єктів з близькими техніко-економічними показниками.

За результатами узагальнення та аналізу даних літературних джерел [2–5], до найбільш поширених типів малоповерхових швидкокомтованих будівель відносяться будівлі збірно-розбірної типу. Використання збірно-розбірних будівель сприяє економії енергоресурсів завдяки зниженню трудомісткості робіт у заводських умовах і скороченню часу монтажу на будівельному майданчику. Однак, це питання потребує подальшого вивчення для детальнішого аналізу ефективності таких технологій у контексті раціонального використання енергоресурсів під час будівництва.

В даний час, крім вдосконалення традиційних конструктивних систем, розробляються і впроваджуються будівлі, що складаються.

Основними перевагами складених будівель в порівнянні зі збірно-розбірними і контейнерними є підвищений ступінь заводської готовності і збільшення корисного об'єму, компактні габаритні розміри для транспортування, скорочення часу використання монтажного крана і кількості робочих будівельної бригади, зайнятих на складанні будівель, зменшення ваги пакетів за допомогою використання полегшених матеріалів [6–8]. Це суттєво впливає на раціональне використання ПЕР під час зведення будинків але водночас потребує додаткових досліджень щодо впливу таких конструкцій на загальні енерговитрати під час будівництва, особливо в умовах різних кліматичних зон та специфіки будівельних процесів.

У зарубіжних дослідженнях та практиці будівництва є досвід розробки та будівництва швидкокомтованих будівель [9–12].

В ряді європейських країн, а також США та Канаді, за швидкою технологією ведеться спорудження будинків різних

конструктивно-технологічних систем - контейнерних, панельних, каркасно-панельних, а також пневматичних та тентових.

Близько 62 % мешканців Канади проживають у малоповерхових будинках. Будівництво малоповерхових швидкокомтованих будівель у Канаді на 8 % випереджає багатоквартирне. Проте малоповерхових індустріальних будівель у Канаді виробляється на 17 % менше, ніж у Сполучених Штатах Америки [10; 12]. У Фінляндії переважними типами малоповерхових будівель є дерев'яно-каркасні в них проживають 66 % власників житла.

З аналізу джерел [9; 11; 20–22] випливає, що за кордоном в галузі проектування та технології швидкого спорудження будівель накопичено значний досвід. У наукових дослідженнях вчених з Англії та Німеччини Вудса С., Канділіса Ж., Моргана П., Чока У., Фрідмана І. основні завдання були спрямовані на подальше вдосконалення конструктивно-технологічних рішень трансформованих будівель з урахуванням нарощування елементів. Дослідження вчених з Італії та Іспанії – П. Солері, І. Бласко, С. Міллера та Р. Штромера, були спрямовані на інновацію конструктивно-технологічних рішень через трансформацію огорожувальних елементів будівель.

В цілому, аналіз літературних даних [9–12; 20–22; 27] щодо будівництва швидкокомтованих будівель за кордоном, показав, що технології будівництва малоповерхових будівель у європейських країнах, а також США та Канаді розвиваються в адаптації до місцевих природно-кліматичних умов, будівельних матеріалів, демографічних тенденцій та екологічних вимог для забезпечення потреб населення будівельною продукцією відповідного профілю. З цього ми бачимо, що за кордоном раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів у будівництві здебільшого стосується швидкокомтованого житла, зокрема збірних конструкцій та блок-контейнерів. Однак

питання ефективного використання ПЕР при спорудженні котеджних містечок та будівництві сіл майже не досліджене, що вимагає подальшого вивчення.

Доволі розгорнутий аналіз законодавчої бази відносно енергозбереження та енергоефективності у будівництві з оглядом не тільки на українські, але і на світові норми був викладений на V Всеукраїнської науково-практичної конференції «Енергоефективність: наука, технології, застосування».

Впровадження енергоефективних технологій в будівельну галузь дозволяє говорити про величезний потенціал для зниження енерговитрат країни, що зумовлено: швидкою окупністю розумно вкладених в енергозбереження коштів; важливими змінами у суспільно-політичному житті країни; змінами у структурі постачання та імпортуванням енергоресурсів; змінами у розподілі коштів бюджету у місцевих громадах [13].

За прогнозами експертів, потенціал ефективного використання енергії до 2030 р. може сягнути 60 % від необхідного енергоспоживання в житлово-комунальній сфері.

Європейський Союз питанням енергоефективності приділяє велику увагу починаючи з 70-х років минулого століття. В Україні на нормативному рівні заходи енергоефективності почали втілюватися починаючи з 2007 року в новому будівництві та реконструкції існуючих будівель житлового й громадського призначення. Так рівень теплоізоляції зовнішніх стін нових будівель починаючи з 2007 року повинні відповідати ДБН В.2.6-31-2006 «Теплова ізоляція будівлі» [14]. В 2010 році затверджено стандарт ДСТУ Б А.2.2-8:2010 [15] який до структури проектної документації ввів окремих розділ «Енергоефективність». На той момент українські нормативи енергоефективності будівель відповідали прийнятій у Європі Директиві 2002/91/ ЄС.

Основними методологічними чинниками цієї директиви є: загальні методики розрахунків; мінімальні вимоги у

новому будівництві; мінімальність при реконструкції; енергетична сертифікація будівель; регулярна інспекція. 22 червня 2017 року Верховна Рада України прийняла закон «Про енергетичну ефективність будівель», який спрямований на зниження енергоспоживання у будівлях. На сучасному рівні вже знайшли своє втілення у нормативних документах України директиви Європейського Союзу: «Про вказування за допомогою маркування та стандартної інформації про товар обсягів споживання енергії та інших ресурсів енергоспоживчими продуктами» (Директива 2010/30/ЄС); та «Про енергоефективність будівель» (Директива 2010/31/ЄС).

На етапі технічної підготовки, обговорення та необхідного погодження перебуває директива: «Про ефективність кінцевого використання енергії та енергетичні послуги» (Директива 2006/32/ЄС) [16]. З виходом у 2013 році стандарту ДСТУ Б EN ISO 13790:2011 [17] відбувся перехід на новий рівень оцінки енерговитрат будівлі, коли поряд з опаленням враховуються енерговитрати і на функціонування системи охолодження. Затвердження стандарту ДСТУ Б А.2.2-12:2015 «Енергетична ефективність будівель».

Зазначені законодавчі та підзаконні акти регулюють питання енергоефективності будівельних матеріалів, спрямовані на зменшення енерговитрат під час експлуатації будівель, однак вони недостатньо враховують аспекти раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів на етапі спорудження малоповерхових будівель.

Викладений у ДСТУ Б А.2.2-12:2015 Енергетична ефективність будівель метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні дозволив здійснити перехід на новий рівень проектування, який враховує під час розрахунку енергоспоживання енерговитрати для функціонування систем опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гаряче водопостачання. Тобто

з'являється можливість оцінити річний цикл експлуатації будівлі та його сумарні енерговитрати. Однак, у викладеному методі розрахунку енергоспоживання знову не враховано раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів на етапі будівництва, що є важливим аспектом для зменшення загальних енерговитрат при спорудженні малоповерхових будівель.

Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України [18] визначає основні методи планування та обліку витрат у будівельному виробництві. Собівартість будівельно-монтажних робіт – це витрати будівельної організації, пов'язані з виконанням будівельно-монтажних робіт із використанням у процесі будівельного виробництва машин, механізмів, устаткування, матеріальних, трудових та інших виробничих ресурсів. Основними методами планування та обліку витрат у будівельному виробництві є: нормативно-ресурсний (нормативна собівартість — сума прямих і накладних витрат), пряма калькуляція (планова калькуляція на кожний об'єкт), індивідуальна калькуляція (поєднання прямої калькуляції з індивідуальним розрахунком), усереднена калькуляція (собівартість на основі усереднених кошторисних норм), аналітичне нормування (норми витрат матеріально-технічних та інших ресурсів), пофакторне планування (розрахунок зміни витрат у порівнянні з базовим періодом), укрупнені розрахунки (на основі обсягу будівельно-монтажних робіт), аналоги (розрахунок на основі аналогічних об'єктів).

Прямі витрати включають заробітну плату робітників, вартість експлуатації будівельних машин і механізмів, вартість матеріалів і конструкцій, які визначаються на основі кошторисних норм і поточних цін ресурсів [19].

Але оглядаючись на стрімкий розвиток технологій і використання різних новітніх матеріалів в сучасному малоповерховому домобудуванні велика кількість нормативних документів, рекомендацій, розпоряджень не можуть в повній мірі вирішити нагальні питання раціонального

використання ПЕР. При цьому сучасні методи організації робіт на будівельному майданчику орієнтовані на скорочення тривалості будівництва, зниження трудомісткості робіт та вартості будівництва. Водночас, ефективність інвестиційно-будівельного процесу зростає із застосуванням заходів з енергозбереження в період спорудження будівель [20; 21]. При цьому, актуальним залишається питання раціонального енергоспоживання не тільки в процесі експлуатації, а й на самому етапі будівництва.

Зважаючи на збільшення обсягів малоповерхового домобудування, важливо розуміти, які питомі енерговитрати при спорудженні 1 м² малоповерхових будівель за різними конструктивними рішеннями, такими як цегляна кладка, використання СІП-панелей, каркасно-панельне та монолітне будівництво. Поряд з цим при спорудженні малоповерхових житлових будівель із застосуванням різних технологій будівництва особливу увагу слід приділяти раціональному споживанню енергоресурсів енергоспоживачами, що працюють на будівельному майданчику [22].

Для оцінки витрат енергоресурсів [23] основних енергоспоживачів будівельного майданчика слід класифікувати за функціональним призначенням:

- для механізації робіт (машини, обладнання та інструмент);
- для влаштування інфраструктури побутового містечка та будівельного майданчика (освітлення, опалення, електропостачання, водопостачання та ін.);
- для забезпечення певних технологічних процесів (підігрів бетону, підігрів ґрунту, зварювальні роботи, застосування теплових гармат та ін.).

Проведений аналіз наукових робіт з проблеми раціонального використання енергоресурсів в будівництві [24; 25] продемонстрував, що будівельне виробництво є енергоємним споживачем ресурсів. Збільшення малоповерхової житлової забудови у загальному обсязі житлового будівництва визначає необхідність проведення оцінки витрат

паливно-енергетичних ресурсів на етапі спорудження будівель. Огляд і аналіз публікацій, а також досліджень з оцінки розвитку та ефективності впровадження програм зі скорочення споживання енергоресурсів [26] показали, що питання енергозбереження в період зведення будівель досліджені недостатньо. Ось покращений варіант з урахуванням наукової лексики:

Крім того, Закон України № 1818-IX «Про енергетичну ефективність» встановлює вимоги щодо раціонального використання енергетичних ресурсів, що підкреслює необхідність поглибленого дослідження та удосконалення організаційно-технологічних рішень із урахуванням ефективного споживання ПЕР під час спорудження малоповерхових житлових будівель. Це, своєю чергою, сприятиме зниженню енерговитрат у будівельній галузі загалом.

Мета дослідження та завдання для її досягнення. Мета дослідження є вдосконалення організаційно-технологічних моделей спорудження малоповерхових житлових будівель з урахуванням інтегральної витрати паливних та енергетичних ресурсів усіма видами енергоспоживачів на всіх стадіях будівництва. Для досягнення зазначеної мети було поставлено такі завдання дослідження:

- визначити склад та класифікувати енергоспоживачів будівельного майданчика під час спорудження малоповерхових житлових будівель;
- провести аналіз особливостей організації та виконання робіт з урахуванням витрати ПЕР у період масового спорудження малоповерхових житлових будівель;
- провести вимірювання фактичної тривалості механізованих робіт та визначити відповідні витрати ПЕР;
- виконати багатокритеріальну оцінку та вибір раціонального варіанту спорудження комплексу малоповерхових житлових будівель з урахуванням витрати ПЕР.

Теоретична значимість дослідження полягає у подальшому розвитку та вдосконаленні організаційно-технологічних моделей спорудження комплексу малоповерхових житлових будівель з урахуванням витрати ПЕР на будівельному майданчику.

Практична значимість полягає у розробці рекомендацій щодо визначення витрати ПЕР при зведенні малоповерхових житлових будівель для застосування в нормативно-методичних документах організаційно-технологічного проектування. На основі результатів дослідження планується розробити рекомендації щодо врахування витрат ПЕР у складі техніко-економічних показників будівельного проекту.

Дослідження базуватиметься на роботах вітчизняних та зарубіжних вчених, фахівців у галузі технології та організації енергоефективного будівельного виробництва, принципах організаційно-технологічного моделювання, державних та регіональних програмах, спрямованих на забезпечення громадян країни доступним та комфортним житлом, а також підвищення енергозбереження та енергоефективності.

Методи дослідження спиратимуться на теорії та практики побудови організаційно-технологічних моделей, методах оптимального планування у будівництві та багатокритеріальній оцінці, порівняння та абстрагування.

Висновки

В останні роки перспективним напрямом у житловому будівництві стало застосування енергозберігаючих технологій, які дозволяють скоротити витрати на споживання енергоресурсів під час експлуатації будівель. Однак етап спорудження будівель відрізняється капітало- і матеріаломісткістю, витратами на використання будівельних машин і механізмів, а також необхідністю організації будівельного майданчика. Ці особливості пов'язані з витрачанням паливних та енергетичних ресурсів на роботу машин, обладнання та механізованого інструменту,

функціонування будівельного майданчика. Результати дослідження дозволять знизити витрати ПЕР при будівництві комплексу малоповерхових будівель, що в свою чергу зменшить собівартість і зробить житло більш доступним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Звіти Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/timeline/Zviti.html>
2. Арутюнян І. А., Данкевич Н. О. Техніко-економічне обґрунтування проектних рішень в будівництві : навч.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗДА, 2018. 132 с.
3. Арутюнян І. А. Наукові основи розвитку будівельної галузі України : монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2017. 460 с.
4. Пік А. І., Ковбашин В. І. Будівельне креслення : посіб. Тернопіль : Університет імені Івана Пулюя, 2018. 6 с.
5. Модульні будівлі для постійного або для відносно короткого періоду використання. URL: <https://barnews.city/articles/214632/scho-take-modulne-budivnictvo>
6. Аналіз ринку модульного будівництва в Україні. URL: <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-modulnogo-stroitelstva-v-ukraine-stranah-es-norvegii-i-islandii-2022-god>
7. Модульні будиночки мають бути тимчасовим житлом. URL: <https://hmarochos.kiev.ua/2022/11/30/modulni-budynochky-mayut-butytymchasovym-zhytloom-ale-v-ukrayini-v-nyh-zhyvut-rokamy/>
8. Будівництво модульних будинків в Україні. URL: <https://bauenhaus.ua/uk/modulnij-budinok/>
9. Ishmametov Kh. R. The model of formation of the spatial organization of shift settlements. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1926, № 1. P. 012036. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012036>
10. KLEUSBERG – your partner for modular construction for over 60 years. KLEUSBERG-Startseite. URL: <https://wissenswert.kleusberg.de/en/company/history/index.html>
11. Kryzhantovska O. A., Rumilec T. S., Morozova T. T. Historical background of the formation of high-density low-storey residential building. *Regional problems of architecture and urban planning*. 2020. № 14. С. 136–142. URL: <https://doi.org/10.31650/2707-403x-2020-14-136-142>
12. The Modularity is Here : a Modern History of Modular Mass Housing Schemes – 99 % Invisible. URL: <https://99percentinvisible.org/article/modularitymodern-history-modular-mass-housing-schemes/>
13. Немченко Ю. В. Нормування енергетичної ефективності будівель. *Наука, технології, застосування : V Всеукр. наук.-практ. конф. з енергоефективності*. 2020. С. 53–56.
14. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-13>
15. ДСТУ Б А.2.2-8:2010. Проектування. Розділ Енергоефективність. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_a_2_2_8/5-1-0-1111
16. Слупський Б. В. Завдання впровадження європейських норм і стандартів з енергоефективності та енергозбереження в Україні. *Інвестиції : практика та досвід*. 2010. № 8. С. 97–99.
17. ДСТУ Б EN ISO 13790:2011. Розрахунок енергоспоживання при опаленні та охолодженні. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_en_iso_13790/5-1-0-1159
18. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. URL: http://online.budstandart.com.ua/catalog/docpage.html?id_doc=61634
19. Міністерство регіонального розвитку та будівництва України 30.10 2007 № 10/8- 608 : Раді міністрів АР Крим, обласним, Київській та Севастопольській міським державним адміністраціям.
20. Lapidus A., Ndayiragije Y. Sip-technology as solution in low-rise multi-family residential buildings. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. P. 06032. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706032.
21. Harris J., Durdyev S., Tokbolat S., Ismail S., Kandymov N., Mohandes S. Understanding construction stakeholders' experience and attitudes toward use of the Structurally Insulated Panels (SIPs) in New Zealand. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, iss. 19. P. 5458. DOI: 10.3390/su11195458.
22. Kroll D., Lovett S. B., Jimenez-Bescos C., Chisnall P., Aitchison M. Passive house vs. passive design : sociotechnical issues in a practice-based design research project for a low-energy house. *Architectural Science Review*. 2019. Pp. 1–11. DOI: 10.1080/00038628.2019.1697924.
23. Solomon A., Latha H. Inspection of properties of Expanded Polystyrene (EPS), Compressive behaviour, bond and analytical examination of Insulated Concrete Form (ICF) blocks using different densities of EPS. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017. Vol. 8 (81). Pp. 209–221.
24. Горбач М. В. Сучасний інструментарій організаційно-технологічного проектування будівництва на засадах енергозбереження : к. т. н. : спец. 05.23.08 – Технологія та організація промислового та цивільного будівництва : захищена: 2015-11-19; Київський національний університет будівництва та архітектури. Київ. URL: <https://nrat.ukrntei.ua/>

25. Климчук М. М. Науково-прикладні засади управління енергозбереженням на будівельних підприємствах : доктор економічних наук : спец. 08.00.04 – Економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності) : захищена 2020-06-02; Київський національний університет будівництва і архітектури. Київ. URL: <https://nrat.ukrintei.ua/>

26. Більовський М. О. Механізми реалізації державної політики енергоефективності та енергозбереження в Україні : доктор філософії : спец. 281 – Публічне управління та адміністрування : захищена 2021-04-29; Національний університет цивільного захисту України. Харків. URL: <https://nrat.ukrintei.ua/>

27. Almaawali S. The effectiveness of thermal insulated concrete blocks in Oman. *Current Trends in Civil & Structural Engineering*. 2020. Vol. 4, iss. 5. DOI: 10.33552/ctcse.2020.04.000600.

REFERENCES

1. *Zvity Ministerstva rozvytku hromad, terytoriy ta infrastruktury Ukrayiny* [Reports of the Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine]. URL: <https://mtu.gov.ua/timeline/Zviti.html> (in Ukrainian).

2. Arutyunyan I.A. and Dankevich N.O. *Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannya proyektykh rishen' v budivnytstvi: navchal'no-metodychnyy posibnyk* [Technical and Economic Justification of Design Solutions in Construction : a textbook]. Zaporizhzhia : ZDA Publ., 2018, 132 p. (in Ukrainian).

3. Arutyunyan I.A. *Naukovi osnovy rozvytku budivel'noyi haluzi Ukrayiny : monohrafiya* [Scientific Foundations of the Development of the Construction Industry of Ukraine : monograph]. Zaporizhzhia : ZDIA Publ., 2017, 460 p. (in Ukrainian).

4. Pik A.I. and Kovbashin V.I. *Budivel'ne kreslennya : posibnyk* [Construction Drawing : Guide]. Ternopil : Ivan Puluj University publ., 2018, 6 p. (in Ukrainian).

5. *Modul'ni budivli dlya postiynoho abo dlya vidnosno korotkoho periodu vykorystannya* [Modular buildings for permanent or relatively short-term use]. URL: <https://barnews.city/articles/214632/scho-take-modulne-budivnictvo> (in Ukrainian).

6. *Analiz rynku modul'noho budivnytstva v Ukrayini* [Analysis of the Modular Construction Market in Ukraine]. URL: <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-modulnogo-stroitelstva-v-ukraine-stranah-es-norvegii-i-islandii-2022-god> (in Ukrainian).

7. *Modul'ni budynochky mayut' buty tymchasovym zhytloom* [Modular houses should be temporary housing]. URL: <https://hmarochos.kiev.ua/2022/11/30/modulni-budynochky-mayut-butytymchasovym-zhytloom-ale-v-ukrayini-v-nyh-zhyvut-rokamy/> (in Ukrainian).

8. *Budivnytstvo modul'nykh budynkiv v Ukrayini* [Construction of modular houses in Ukraine]. URL: <https://bauenhaus.ua/uk/modulnij-budinok/> (in Ukrainian).

9. Ishmametov Kh.R. The model of formation of the spatial organization of shift settlements. *Journal of Physics : Conference Series*. 2021, vol. 1926, no. 1, p. 012036. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012036>

10. KLEUSBERG – your partner for modular construction for over 60 years. KLEUSBERG – Startseite. URL: <https://wissenswert.kleusberg.de/en/company/history/index.html>

11. Kryzhantovska O.A., Rumilec T.S. and Morozova T.T. Historical Background of the Formation of High-Density Low-Storey Residential Building. *Regional Problems of Architecture and Urban Planning*. 2020, no. 14, pp. 136–142. URL: <https://doi.org/10.31650/2707-403x-2020-14-136-142>

12. The Modularity is Here : A Modern History of Modular Mass Housing Schemes – 99 % Invisible. URL: <https://99percentinvisible.org/article/modularitymodern-history-modular-mass-housing-schemes/>

13. Nemchenko Y.V. *Normuvannya enerhetychnoyi efektyvnosti budivel'* [Standardization of Energy Efficiency in Buildings]. *Nauka, tekhnolohiyi, zastosuvannya : V Vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi z enerhoefektyvnist'* [Science, Technology, Applications : V All-Ukrainian Scientific and Practical Conference on Energy Efficiency]. 2020, pp. 53–56. (in Ukrainian).

14. *DBN V.2.6-31:2016. Teplova izolyatsiya budivel'* [DBN V.2.6-31:2016. Thermal Insulation of Buildings]. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-13> (in Ukrainian).

15. *DSTU B A.2.2-8:2010. Proektuvannya. Rozdil Enerhoefektyvnist'* [DSTU B A.2.2-8:2010. Design. Energy Efficiency Section]. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_a_2_2_8/5-1-0-1111 (in Ukrainian).

16. Slupskyi B.V. *Zavdannya vprovadzhennya yevropeys'kykh norm i standartiv z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennya v Ukrayini* [The Task of Implementing European Norms and Standards on Energy Efficiency and Energy Saving in Ukraine]. *Investytsiyi : praktyka ta dosvid* [Investment : Practice and Experience]. 2010, no. 8, pp. 97–99. (in Ukrainian).

17. *DSTU B EN ISO 13790:2011. Rozrakhunok enerhospozhyvannya pry opalenni ta okholodzhenni* [DSTU B EN ISO 13790:2011. Calculation of Energy Consumption for Heating and Cooling]. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_en_iso_13790/5-1-0-1159 (in Ukrainian).

18. *DSTU B A.2.2-12:2015. Enerhetychna efektyvnist' budivel'. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannya pry opalenni, okholodzhenni, ventylyatsiyi, osviltleni ta haryachomu vodopostachanni* [DSTU B A.2.2-12:2015. Energy

Efficiency of Buildings. Method for Calculating Energy Consumption for Heating, Cooling, Ventilation, Lighting, and Hot Water Supply]. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage.html?id_doc=61634 (in Ukrainian).

19. *Ministerstvo rehional'noho rozvytku ta budivnytstva Ukrainy 30.10 2007 No. 10/8-608 : Radi ministriv AR Krym, oblasnym, Kyivskiy ta Sevastopol'skiy mis'kym derzhavnym administratsiyam* [Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 30.10.2007, no. 10/8-608 : to the Council of Ministers of the Autonomous Republic of Crimea, Regional, Kyiv, and Sevastopol City State Administrations]. (in Ukrainian).

20. Lapidus A. and Ndayiragije Y. SIP-Technology as a Solution in Low-Rise Multi-Family Residential Buildings. E3S Web of Conferences. 2019, vol. 97, p. 06032. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706032.

21. Harris J., Durdyev S., Tokbolat S., Ismail S., Kandymov N. and Mohandes S. Understanding Construction Stakeholders' Experience and Attitudes Toward the Use of Structurally Insulated Panels (SIPs) in New Zealand. Sustainability. 2019, vol. 11, iss. 19, p. 5458. DOI: 10.3390/su11195458.

22. Kroll D., Lovett S.B., Jimenez-Bescos C., Chisnall P. and Aitchison M. Passive House vs. Passive Design : Sociotechnical Issues in a Practice-Based Design Research Project for a Low-Energy House. Architectural Science Review. 2019, pp. 1–11. DOI: 10.1080/00038628.2019.1697924.

23. Solomon A. and Latha H. Inspection of Properties of Expanded Polystyrene (EPS), Compressive Behaviour, Bond and Analytical Examination of Insulated Concrete Form (ICF) Blocks Using Different Densities of EPS. International Journal of Civil Engineering and Technology. 2017, vol. 8 (81), pp. 209–221.

24. Horbach M.V. *Suchasnyy instrumentariy orhanizatsiyno-tehnologichnoho proektuvannya budivnytstva na zasadakh enerhozberezhennya : k. t. n. : spets. 05.23.08 – Tekhnolohiya ta orhanizatsiya promyslovoho ta tsyvil'noho budivnytstva: zakhyschena 2015-11-19; Kyivskyy natsional'nyy universytet budivnytstva ta arkhitektury, Kyiv* [Modern Tools for Organizational and Technological Design of Energy-Efficient Construction : PhD Thesis : Speciality 05.23.08 – Technology and Organization of Industrial and Civil Construction: Defended 2015-11-19; Kyiv National University of Construction and Architecture], Kyiv. URL: <https://nrat.ukrintei.ua/> (in Ukrainian).

25. Klymchuk M.M. *Naukovo-prykladni zasady upravlinnya enerhozberezhenniam na budivel'nykh pidpryemstvakh : Doktor ekonomichnykh nauk : spets. 08.00.04 – Ekonomika ta upravlinnya pidpryemstvamy (za vydamy ekonomichnoyi diyal'nosti) : zakhyschena 2020-06-02; Kyivskyy natsional'nyy universytet budivnytstva i arkhitektury, Kyiv* [Scientific and Applied Principles of Energy Management in Construction Enterprises : Doctor of Economic Sciences : Speciality 08.00.04 – Economics and Enterprise Management (by Types of Economic Activity) : Defended 2020-06-02; Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv]. URL: <https://nrat.ukrintei.ua/> (in Ukrainian).

26. Bilovskyi M.O. *Mekhanizmy realizatsiyi derzhavnoyi polityky enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennya v Ukraini : Doktor filosofiyi : spets. 281 – Publichne upravlinnya ta administruvannya: zakhyschena 2021-04-29; Natsional'nyy universytet tsyvil'noho zakhystu Ukrainy, Harkiv* [Mechanisms for Implementing State Policy on Energy Efficiency and Energy Saving in Ukraine : Doctor of Philosophy : Speciality 281 – Public Administration: Defended 2021-04-29; National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv]. URL: <https://nrat.ukrintei.ua/> (in Ukrainian).

27. Almaawali S. The Effectiveness of Thermal Insulated Concrete Blocks in Oman. Current Trends in Civil & Structural Engineering. 2020, vol. 4, iss. 5. DOI: 10.33552/ctse.2020.04.000600.

Надійшла до редакції: 03.12.2024.

УДК 331.45:504.064.36

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.106.1135

ЗМІНИ В ПІДХОДАХ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ЗГІДНО РЕКОМЕНДАЦІЙ МІЖНАРОДНОЇ КОМІСІЇ З РАДІАЦІЙНОГО ЗАХИСТУ

СУХИЙ К. М.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
БЄЛКОВ А. С.², *докт. техн. наук, проф.*,
ПИЛИПЕНКО О. В.³, *канд. техн. наук, доц.*,
РИБАЛКА К. А.^{4*}, *канд. техн. наук, доц.*,
АНДРЕЄВА А. В.⁵, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Науки, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-05, e-mail: k.m.sukhyi@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4585-8268

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: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

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: pylypenko.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0007-2987-7905

^{4*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 905-51-42, e-mail: ekaterina.rybalka1980@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7049-6871

⁵ Кафедра екології та природоохоронних технологій, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, пр. Героїв України, 9, 54007, Миколаїв, Україна, тел. +38 (096) 695-00-59, email: antonina.andrieieva@nuos.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0361-5436

Анотація. Постановка проблеми. Рекомендації Міжнародної Комісії з Радіаційного Захисту – це науково обґрунтовані дослідження незалежної, міжнародної, неурядової організації науковців, яка надає рекомендації з радіаційного захисту в різних сферах життя та діяльності людини при взаємодії з навколишнім середовищем, з флорою, фауною та людиною. МКРЗ розробляє принципи та підходи до радіаційного захисту, які використовуються урядами та недержавними організаціями по всьому світу для встановлення законодавчих норм, стандартів і процедур безпеки. **Мета статті** – полягає в проведенні всебічного аналізу публікацій Міжнародної комісії з радіаційного захисту з початку її перших звітів і до випуску останніх звітів в період 2020–2024 рр., визначити які з цих рекомендацій та встановлених регламентів були застосовані в національних нормативно-правових документах України, дослідити їх вплив на певні сфери діяльності в системі «Людина – навколишнє середовище – джерела іонізуючого випромінювання». **Задачи статті.** Провести поетапний аналіз виданих Рекомендацій МКРЗ по роках; побудувати блок-схеми підходів радіаційного захисту різних галузей таких як медицина, радіоактивні відходи, моніторинг територій тощо; визначити вплив виданих рекомендацій на формування, редакцію і сталий розвиток національних нормативно-правових документів України. **Висновки.** Розроблені в статті блок-схемах наглядно показують, як змінювались публікації МКРЗ і до яких подальших досліджень підштовхували. Спираючись на нові дослідження, які вийшли за останні 10–15 років, з'явилась життєва та професійна потреба розробити нові Норми радіаційної безпеки, Основні санітарні правила та Державні будівельні норми з питань радіаційної безпеки в будівництві, із введенням таких термінів як: адміністративні та об'єктові рівні доз, модель зовнішнього та внутрішнього опромінення персоналу, протокол дії, стандартна людина, референтний вік, індивідуальні об'єктові ризики, метаболізм радіонуклідів в організмі, фантом людини та ввести інші терміни та визначення в нормативні документи України.

Ключові слова: *радіаційний захист; іонізуюче випромінювання; Міжнародна комісія з радіаційного захисту; моніторинг*

CHANGES IN APPROACHES TO ENSURING RADIATION SAFETY ACCORDING TO THE RECOMMENDATIONS OF THE INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION PROTECTION

SUKHYI K.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

BIELIKOV A.S.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
PYLYPENKO O.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
RYBALKA K.A.^{4*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
ANDRIEIEVA A.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Fuel, Polymer, and Polygraphic Materials Technologies, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Ukrainian State University of Chemistry and Technology”, 8, Sciences Ave., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-05, e-mail: k.m.sukhyi@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4585-8268

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: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

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) 756-34-73, e-mail: pylypenko.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0007-2987-7905

^{4*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 905-51-42, e-mail: ekaterina.rybalka1980@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7049-6871

⁵ Department of Ecology and Environmental Technologies, National University of Shipbuilding. Admiral Makarov, 9, Avenue of Heroes of Ukraine, Mykolaiv, 54007, Ukraine, tel. +38 (096) 695-00-59, e-mail: antoninaandrieieva@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0361-5436

Abstract. Problem statement. Recommendations of the International Commission on Radiation Protection are scientifically based studies of an independent, international, non-governmental organization of scientists, which provides recommendations on radiation protection in various spheres of human life and activity when interacting with the environment, with flora, fauna and man. The ICRC develops principles and approaches to radiation protection that are used by governments and non-governmental organizations around the world to establish legislative norms, standards and safety procedures. **The purpose of the article** is to conduct a comprehensive analysis of the publications of the International Commission on Radiation Protection from the beginning of its first reports to the release of the latest reports in the period 2020–2024, to determine which of these recommendations and established regulations were applied in the national normative legal documents of Ukraine and to investigate their impact on certain spheres of activity in the system “Man – environment – sources of ionizing radiation”. **Tasks of the article.** Carry out a step-by-step analysis of the issued ICRP Recommendations by year; to build block diagrams of radiation protection approaches in various fields such as medicine, radioactive waste, territory monitoring, etc.; to determine the impact of the issued recommendations on the formation, editing and sustainable development of national regulatory and legal documents of Ukraine. **Conclusions.** The block diagrams developed in the article clearly show how the ICRC publications changed and what further research was encouraged. Based on new researches that have come out in the last 10–15 years, there was a vital and professional need to develop new Radiation Safety Norms, Basic Sanitary Rules and State Building Regulations on radiation safety in construction, with the introduction of such terms as: administrative and object dose levels, model of external and internal exposure of personnel, protocol of action, standard person, reference age, individual object risks, human phantom and introduce other terms and definitions into regulatory documents of Ukraine.

Keywords: *radiation protection; ionizing radiation; International Commission on Radiation Protection; monitoring*

Постановка проблеми. Рекомендації Міжнародної комісії з радіаційного захисту (МКРЗ) є ключовими настановами в галузі радіаційного безпеки, радіаційного захисту, захисту від впливу джерел іонізуючого випромінювання, медичної радіології, радіаційного захисту персоналу атомних станцій та населення, проведення досліджень на радіаційно-небезпечних територіях тощо [1]. Міжнародні організації та національні органи влади, відповідальні за радіаційну захист, а також особи та організації, які використовують іонізуюче випромінювання, прийняли рекомендації та

принципи Комісії, як ключові засади своїх захисних заходів. Так діючі Норми радіаційної безпеки України [2], ґрунтуються на рекомендаціях Комісії, в період з 1959 по 1991 рік та синхронізовані з міжнародною методологічною базою.

Актуальність. Враховуючи поступові зміни рекомендацій МКРЗ в часі та спираючись на новітні досягнення технічного та технологічного сталого розвитку, з’явилась необхідність врахування нових наукових досягнень у сфері радіаційного захисту людини від впливу джерел іонізуючого випромінювання (ДІВ).

Наука про вплив іонізуючого випромінювання (ІВ) та захист від нього постійно розвивається, тому важливо аналізувати, як ці зміни впливають на державну політику і практику захисту населення та працівників з точки зору радіаційних ризиків. Зміни в рекомендаціях МКРЗ мають безпосередній вплив на міжнародне і національне законодавство, а також на загальні стандарти радіаційної безпеки.

Аналіз публікацій. Перша з цілої серії таких публікацій, Публікація 1, містила рекомендації, затверджені в 1958 році (ICRP, 1959). Через два десятиліття років вийшли у світ рекомендації у вигляді Публікації 26 (ICRP, 1977). У Публікації 26 Комісія дала кількісні оцінки ризиків стохастичних радіаційних ефектів та запропонувала систему обмеження доз опромінення, що базується на трьох принципах обґрунтування та оптимізації захисту, а також дотримання меж дози.

Через два роки вийшла в світ Публікація МКРЗ 30 (ICRP, 1980): Обмеження щодо для надходження радіонуклідів працівникам, а після ще три частини Limits for Intakes of Radionuclides by Workers (1980–1982 pp). Ці частини являють звіти в яких детально розглядаються такі питання:

➤ **Біокінетичні моделі** для оцінки внутрішньої дози при потрапленні радіонуклідів до організму. Ці моделі враховують розподіл, затримку та виведення радіонуклідів в різних органах і тканинах.

➤ **Дозові коефіцієнти** для різних радіонуклідів, які застосовуються для визначення кількості опромінення у разі потраплення радіоактивних речовин до організму через дихальні шляхи, шкіру чи травний тракт.

➤ **Підходи до індивідуального моніторингу та захисту** для робітників, які працюють з джерелами радіації.

➤ **Обґрунтування лімітів доз** для робітників у сфері ядерної енергетики, медицини та інших галузях.

Публікація МКРЗ № 60 (ICRP, 1991), є однією з базових праць у сфері радіаційної безпеки, яка оновила підходи до

радіаційного захисту, запропонувала нові принципи захисту та нормативи, замінивши застарілі положення публікації № 26. Основні аспекти цієї публікації охоплюють наступні ключові моменти:

МКРЗ № 60 затвердила три основоположні принципи радіаційного захисту, які стали фундаментом для національних і міжнародних нормативних актів:

✓ **Оправданість (Justification):** кожен вид діяльності, що призводить до опромінення, повинен приносити більше користі, ніж шкоди. Усі рішення щодо впровадження джерел випромінювання мають ґрунтуватися на оцінці користі для суспільства.

✓ **Оптимізація (Optimization):** дози опромінення мають бути настільки низькими, наскільки це можливо, з урахуванням економічних та соціальних чинників. Цей принцип відомий як принцип ALARA (As Low As Reasonably Achievable – настільки низько, наскільки це можливо досягти).

✓ **Лімітування доз (Dose Limitation):** встановлені чіткі межі (ліміти) для доз опромінення працівників і населення, щоб уникнути неприпустимих ризиків для здоров'я.

Публікація МКРЗ № 60 встановила такі терміни та принципи:

➤ **Ефективна та еквівалентна доза.** МКРЗ № 60 ввела розділення на **еквівалентну дозу** (яка враховує вид радіації) і **ефективну дозу** (яка враховує радіочутливість окремих органів і тканин). Ефективна доза дозволяє краще оцінити сукупний ризик для організму, незалежно від того, які частини тіла піддаються опроміненню, що зробило оцінку дози більш точною та науково обґрунтованою.

➤ **Перегляд дозових лімітів.** Публікація № 60 знизила дозові ліміти для професійного та громадського опромінення, визнаючи нові наукові дані про радіаційні ризики. Так для працівників (Категорія А) встановлений ліміт 20 мЗв/рік, з максимумом у 50 мЗв у будь-який рік, що стало значно нижчим за попередні норми.

➤ *Визначення категорій опромінення.* Публікація розділила опромінення на три категорії:

- *Професійне опромінення:* для людей, які піддаються радіації у зв'язку з роботою (наприклад, у ядерній енергетиці чи медицині).

- *Медичне опромінення:* пов'язане з діагностикою та лікуванням пацієнтів, для якого не встановлюється ліміт дози, але рекомендується ретельне обґрунтування та оптимізація.

- *Опосередковане (вторинне) опромінення населення:* це вплив на людей, які не мають прямого контакту з джерелами радіації.

➤ *Зміни у підходах до управління аварійними ситуаціями.* МКРЗ № 60 підняла важливість готовності до радіаційних аварій та розробки спеціальних стратегій для захисту населення в таких ситуаціях. Запропоновані підходи зосереджені на зниженні впливу та мінімізації доз у випадках непередбачених аварій.

Метою статті Провести аналіз публікацій МКРЗ та виявити актуальні задачі та ефективні заходи забезпечення радіаційної безпеки населення та працівників, які працюють на радіаційно-небезпечних об'єктах з подальшими пропозиціями оновлення сучасного законодавства України. Провести аналіз виданих Рекомендацій МКРЗ, як загальних, так і стосовно особливостей поводження з радіоактивними матеріалами, зі подальшим зниженням негативного впливу джерел іонізуючих випромінювань на стан радіаційної небезпеки в Україні.

В попередніх статтях [3–7] авторами були послідовно проаналізовані та розкриті наступні теми: формування нормативно-правової бази у сфері охорони та фізичного захисту особовим складом ВВО ДП «38 ВІТЧ»; особливості проведення моніторингових та дослідних робіт на режимній території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ»; особливості організації радіаційного контролю на об'єктах ядерно-паливного комплексу; технічні засоби ведення радіаційного

контролю на РНО; застосування комплексу проти радіаційних та проти радонових заходів; ідентифікацію загроз та небезпек в умовах діючих промислових майданчиків з мінімізацією ризиків від впливу іонізуючих джерел опромінення на персонал.

Виклад матеріалу. Розглянемо основні загальні Рекомендації МКРЗ які виходили та які з них вже замінені, але були початком норм в радіаційній безпеці. Першою загальною Публікацією МКРЗ була Рекомендації Міжнародної комісії з радіологічного захисту, яка вийшла у вересні 1958 року.

Наступною що оновила її була Публікація № 6 (ICRP, 1962). 1964 року, вона додала рекомендації щодо управління і утилізації радіоактивних матеріалів у медичних закладах та дослідницьких установах. Всього через 2 роки у 1966 вийшла Публікація № 9 (ICRP, 1966), що оновила Публікацію № 6. Надавала нові рекомендації щодо обмеження доз опромінення для працівників і загального населення, враховуючи нові наукові дані і технологічні досягнення на той час. Блок-схема зміни ранніх Публікацій МКРЗ представлено на рисунку 1.



Рис. 1. Блок-схема зміни ранніх Публікацій МКРЗ

В 1977 році вийшла вагома Публікація № 26 (ICRP, 1977), що об'єднує основні

принципи та практичні рекомендації з управління радіаційними ризиками, включаючи концепцію радіаційного захисту, принципи оптимізації доз, стандарти допустимих доз і методи моніторингу та контролю. Публікація представляє нові підходи до радіаційного захисту, які враховують сучасні досягнення в науці і технології.

Наступним ключовим документом є Публікація № 60 1991 року. Вона містить основні знання і досягнення станом на 1990 рік. Представляє оновлені принципи і практичні рекомендації щодо радіаційного захисту, включаючи концепції оптимізації, дозових обмежень і принципу «отримання доз як можна нижчими, ніж досяжно». Вона

описує підходи до оцінки і управління ризиками, пов'язаними з іонізуючим випромінюванням, та надає рекомендації для захисту працівників, населення та навколишнього середовища.

Найбільш актуальним та загальним документом зараз є Публікація № 103, яка формально замінює попередні Рекомендації МКРЗ № 60 (ICRP, 1991), а також оновлює, консолідує і розвиває додаткові керівництва з контролю за опроміненням від джерел іонізуючого випромінювання, видані в 1991 році. Розглянемо загальну блок-схему змін загальних рекомендацій МКРЗ на рисунку 2 – Блок-схема змін загальних Рекомендацій МКРЗ.

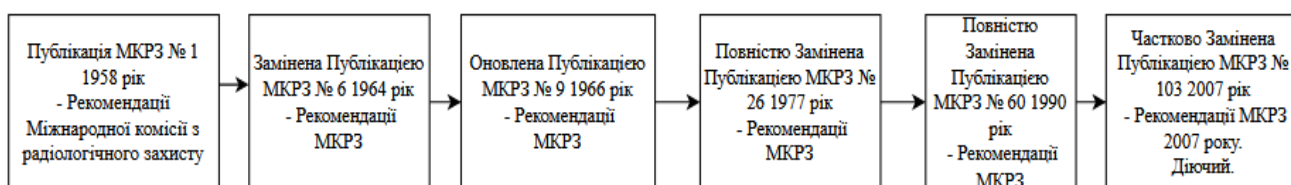


Рис. 2. Блок-схема змін загальних Рекомендацій МКРЗ

Однак всі ці Публікації є загальними та не охоплюють цілком питання радіаційного захисту та захоронення радіаційно-забруднених територій.

Першою Публікацією що розглядала саме радіаційний захист окремо, була Публікація № 15 1970 року, вона надає рекомендації з радіаційного захисту від зовнішніх джерел іонізуючого випромінювання. Охоплює принципи і методи захисту від різних видів зовнішнього опромінення, таких як рентгенівське, гамма-і бета-випромінювання.

На доповнення її вийшла Публікація № 21 (ICRP, 1971), яка надавала додаткові дані для захисту від іонізуючого випромінювання зовнішніх джерел. Також вона містила оновлені та доповнені дані щодо оцінки доз опромінення.

Частково оновила її Публікація № 26, яку ми вже розглядали вище та вона була загальною, а більш зосереджена саме на захисту від радіаційного опромінення була Публікація № 33 (ICRP, 1982), яка хоча і брала більше до уваги радіаційний захист саме в медицині, однак була підготовлена в

світлі рекомендацій та замінює публікації МКРЗ 15 і 21. Надавала рекомендації щодо захисту від іонізуючого випромінювання від зовнішніх джерел, які використовуються в медицині. Публікація охоплювала аспекти безпеки для медичних працівників і пацієнтів надаючи рекомендації щодо контролю рівнів радіації, проектування медичних установ.

Наступним документом можливо вважати Публікацію № 43 1985, яка надавала основні принципи моніторингу для забезпечення радіаційного захисту населення. Публікація охоплює аспекти вимірювання і контролю радіаційного середовища, а також стратегії моніторингу для оцінки впливу радіації на населення. Однак вона не зовсім про радіаційний захист, тому буде окремо.

Далі була вагома Публікація № 65 (ICRP, 1963), яка була присвячена захисту від радіації, пов'язаної з радоном-222, як в домашніх умовах, так і на робочих місцях. Публікація розглядає джерела радону-222, вплив на здоров'я, методи моніторингу і

контролю, а також стратегії для зменшення рівнів радону-222.

Публікація № 82 (ICRP, 1999), надає настанови щодо застосування системи радіологічного захисту МКРЗ до ситуацій тривалого опромінення населення. У ньому розглядається загальне застосування систем радіаційного захисту для контролю тривалого опромінення в результаті практичної діяльності та проведення заходів у ситуаціях тривалого опромінення.

Оновила та замінила минулу Публікацію даними за 8 років, Публікація № 103 (ICRP, 2007), яка була присвячена загальним питанням та Публікація № 104, яка надала огляд різних заходів контролю, що використовуються для забезпечення радіаційного захисту. Публікація розглядає широкий спектр методів і практик для контролю і зменшення радіаційних ризиків у різних сферах діяльності, включаючи медичну радіологію, ядерну промисловість та інші галузі, де є радіаційні джерела.

Одна з наступних Публікацій № 108 (ICRP, 2008), була присвячена питанню захисту навколишнього середовища, але залишили її лише на рівні концепції.

На заміну та оновлення даних була випущена Публікація № 126 (ICRP, 2014), року, що надала оновлене керівництво з радіологічного захисту від опромінення радоном. Звіт був розроблений з урахуванням останніх рекомендацій МКРЗ щодо системи радіологічного захисту, всіх наявних наукових знань про ризики, пов'язані з радоном, а також досвіду, накопиченого багатьма організаціями та країнами у сфері контролю за опроміненням від радону.

Одна з останніх на теперішній час Публікація № 147 (ICRP, 2020), яка більш теоретична та зосереджується на застосуванні дозових величин у радіологічному захисті. Публікація надає детальний огляд різних дозових величин, що використовуються для оцінки і управління радіаційними ризиками, таких як ефективна доза, доза органу та доза тканини. Вона також розглядає їх використання в контексті різних сценаріїв опромінення, включаючи

медичні процедури, промислові процеси і екологічні ситуації.

Наступною темою буде методологія розрахунків, першою Публікацією яка вийшла в 1966 році була № 8, в котрій були методологічні рекомендації та основи для оцінки ризиків, які виникають внаслідок опромінення іонізуючим випромінюванням.

Далі нові методології розрахунків були представлені у 1977 році в Публікації № 26, яку ми вже розглядали вище. Окрім загальних рекомендацій вона мала в собі принципи оптимізації доз, стандарти допустимих доз і методи моніторингу та контролю.

Повністю замінила її загальна Публікація № 60 1991 року, в котрій все одно були концепції оптимізації, дозових обмежень та підходи до оцінки і управління ризиками, пов'язаними з іонізуючим випромінюванням. Через 16 років, у 2007 р., вийшла Публікація № 103, що повністю замінила шляхом оновлення минулу Публікацію № 60, вона містила додаткові керівництва з контролю за опроміненням від джерел іонізуючого випромінювання, що включає до себе і методологію розрахунків.

Найбільш очікуваною з останніх звітів була Публікація № 152. Публікація МКРЗ № 152 (ICRP, 2020), є однією з технічних рекомендацій, зосереджених на практичних аспектах моніторингу та оцінки радіаційної безпеки. Вона включає детальні методології для вимірювання та оцінки радіаційних доз, особливо у випадках впливу на робітників, які працюють з радіоактивними матеріалами. Основні аспекти цієї публікації такі:

1. Моніторинг доз опромінення робітників. Публікація № 152 надає детальні рекомендації щодо методів індивідуального моніторингу працівників, які піддаються професійному радіаційному опроміненню. Документ описує: методи визначення поглинутої дози за допомогою персональних дозиметрів та підходи до регулярного моніторингу доз внутрішнього та зовнішнього опромінення для працівників, що контактують з джерелами іонізуючого випромінювання.

2. Оцінка внутрішнього опромінення. Публікація висвітлює методи оцінки доз від внутрішнього опромінення (коли радіоактивні матеріали потрапляють в організм через вдихання, проковтування або через шкіру). Вона пропонує: використання біокінетичних моделей для розрахунку доз, що дозволяє врахувати метаболізм радіонуклідів в організмі. Практичні рекомендації з відбору зразків біоматеріалів (наприклад, сечі чи крові) для оцінки вмісту радіонуклідів.

3. Оцінка зовнішнього опромінення. МКРЗ № 152 також містить інструкції щодо вимірювання доз зовнішнього опромінення, з використанням портативних і персональних дозиметрів для фіксації доз, отриманих від зовнішніх джерел випромінювання. Особливий увазі відведено до змісту моніторингу тих частин тіла, які можуть бути найбільше піддані впливу, таких як руки, кисті та голова.

4. Рекомендації щодо радіаційного захисту. Документ містить настанови для управління ризиками радіаційного

опромінення у професійному середовищі, з встановленням допустимих рівнів доз для персоналу з застосуванням метода оптимізації захисних заходів відповідно до принципу ALARA.

5. Розрахунок ефективної дози та управління дозами. Публікація дає рекомендації щодо розрахунку ефективної дози (враховуючи специфіку органів та тканин) та методів управління дозами, які отримує персонал. Вона надає математичні моделі та коефіцієнти, які дозволяють проводити більш точну оцінку опромінення.

Публікація МКРЗ № 152 стала важливим інструментом для контролю радіаційного захисту на практиці, надавши чіткі методології для регулярного моніторингу та оцінки доз опромінення у професійному середовищі. Вона є корисним ресурсом для фахівців у галузі радіаційної безпеки та допомагає забезпечити дотримання вимог щодо захисту здоров'я персоналу. Зміни в методологічних підходах представлені на рисунку 3.

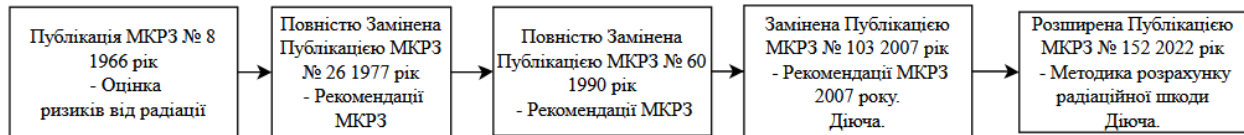


Рис. 3. Блок схема Публікацій МКРЗ – Методологія розрахунків

З наявною базою методів розрахунків почав розвиватися радіаційний захист в медицині. Більш докладно зупинитися на ньому не будемо.

Для розуміння детермінованих, стохастичних та генетичних ефектів

необхідно було визначити часові тенденції щодо розвитку підходів радіаційного захисту в медицині які змінювались в залежності від технічних засобів ведення діагностики та профілактичних процедур представлених на рисунку 4.

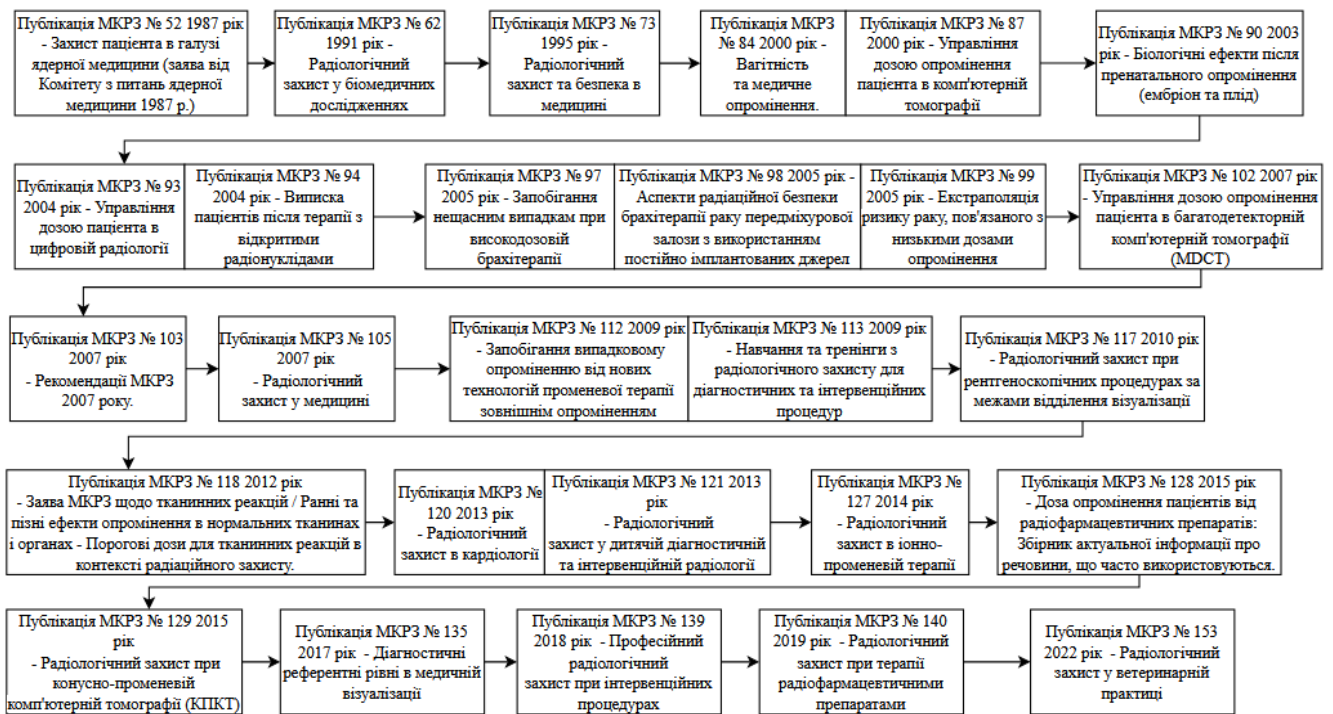


Рис. 4. Блок-схема Публікацій МКРЗ – радіаційна безпека в медицині

Виходячи з попередніх досліджень побудуємо схему– радіаційна безпека при утилізації радіоактивних відходів, що були висвітлені в різних Публікаціях МКРЗ (рис. 5).

Ця блок-схема показує, як з накопиченням знань про тверді та рідкі радіоактивні відходи змінювались підходи щодо утилізації РАВ в геологічних захороненнях та на спеціалізованих відкритих майданчиків довго існуючих твердих радіоактивних відходів. У звіті пояснюється, як система радіологічного захисту, описана в Публікації 103, може бути застосована в контексті геологічного захоронення довго існуючих твердих РВ.

Для побудови семи ведення моніторингу на РНО та об'єктах ЯПЦ, з урахуванням попередніх досліджень було розроблено та представлено схему ведення радіаційного моніторингу (рис. 6).

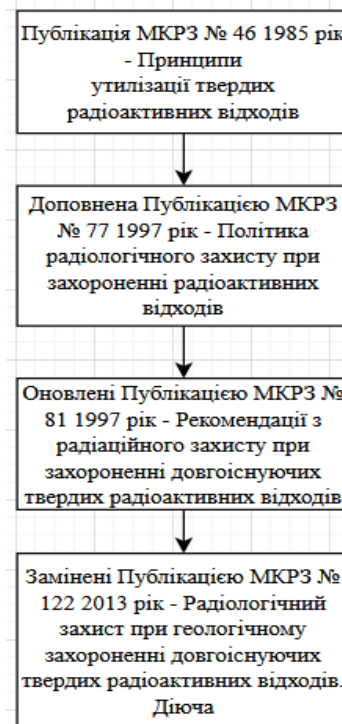


Рис. 5. Блок-схема Публікацій МКРЗ – радіаційна безпека при утилізації радіоактивних відходів

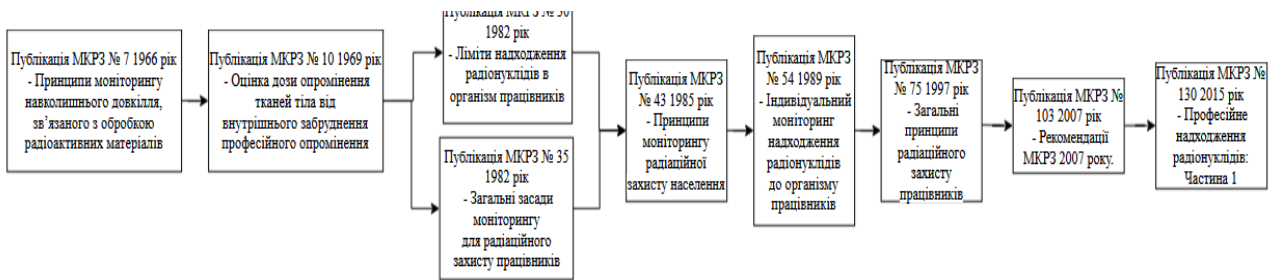


Рис. 6. Блок-схема Публікацій МКРЗ – дози опромінення при проведенні моніторингу на радіаційно-забруднених територіях

Спираючись на опубліковані Публікації МКРЗ та розроблені авторами блок-схеми, можна збудувати загальну структурну схему

присвячену питанням радіаційного захисту персоналу РНО та населення України (рис. 7).

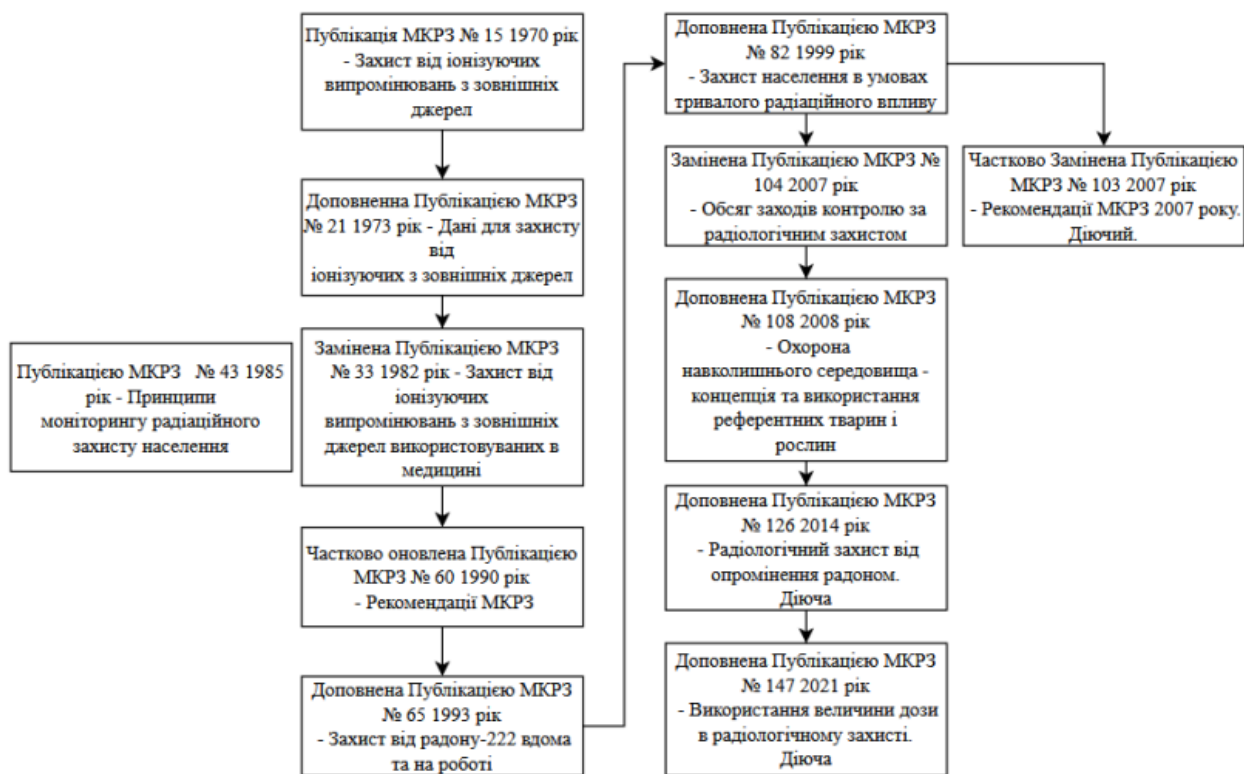


Рис. 7. Блок-схема Публікацій МКРЗ – питання радіаційного захисту від іонізуючого випромінювання

Розроблені та запропоновані в даній статті схеми (див. рис. 5–7) дозволяють проаналізувати шлях наукових та практичних досліджень за майже 100 років існування комісії. Також проведений аналіз дозволяє простежити динаміку Публікацій МКРЗ в часі, виявити основні світові тенденції в медицині, аварія на об'єктах ЯПЦ, застосуванням методів, приладів та методологічних підходів в сфері радіаційної безпеки людини та впливу на навколишнє середовище Землі.

Висновок

1. На основі проведеного аналізу науково-практичних публікацій МКРЗ з питань радіаційної безпеки були проаналізовані та запропоновані рішення певних спірних питань в розрізі дослідження впливу джерел іонізуючого випромінювання на діяльність системи «Людина – навколишнє середовище – джерела іонізуючого випромінювання», виникла ціла низка дискусійних питань в сфері дослідження вплив джерел

іонізуючого випромінювання на умови праці робітників радіаційно-небезпечних об'єктів.

2. Аналіз виданих рекомендацій Міжнародної комісії з радіаційного захисту, в період з 1962 року до 2024 року показав, що найбільший вплив на формування теоретичної, методологічної та загально концептуальної бази дали саме публікації МКРЗ № 60, 103, 118, 126, 130, 134, 141 та 152. Рекомендації МКРЗ № 30, 35, 46, 60 заклали основу для радіаційної безпеки працівників, надавши зрозумілі інструменти для регулювання радіаційного впливу на національному та міжнародному рівнях. Публікації МКРЗ вплинули на безліч нормативних документів, що застосовуються у сферах ядерної енергетики, медицини, видобутку корисних копалин, в аграрній сфері, в промисловості, а також сприяв подальшому розвитку науки про радіаційний захист людини та навколишнього середовища.

3. Проведений нами аналіз, згідно до розроблених авторами в статті блоксхем, наглядно показують, як змінювались та розвивались публікації МКРЗ. Аналіз базових аспектів, підходів, методик, висновків, викладених в публікаціях МКРЗ, дозволили виявити небезпеки, що

впливають на робітників колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ» та визначити подальші напрямки наукових та практичних досліджень колективу кафедри охорони праці, цивільної та техногенної безпеки Українського державного університету науки і технологій (УДУНТ ННІ «ПДАБА»).

4. Спираючись на нові дослідження, які вийшли за останні 10–15 років, з'явилась життєва та професійна необхідність розробити нові «Норми радіаційної безпеки», «Основні санітарні правила» та «Державні будівельні норми» з питань радіаційної безпеки в будівництві, із введенням в них таких термінів: адміністративні та об'єктові рівні доз, категорія радонової небезпеки, модель зовнішнього та внутрішнього опромінення персоналу, протокол дії, стандартна людина, референтний вік, індивідуальні об'єктові ризики, метаболізм радіонуклідів в організмі, фантом людини тощо та ввести терміни в інші нормативні документи України. Це дозволить чітко визначити критерії небезпек пов'язаних впливом іонізуючих випромінювань і вдосконалити заходи захисту від них.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Офіційний сайт Міжнародної комісії з радіаційного захисту. URL: <http://www.ICRP.org>
2. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) від 14.07.1997 р. № 208. Київ : МОЗ, 1997.
3. Соколов І. А., Запрудін В. Ф., Беліков А. С., Пилипенко О. В., Савицький М. В., Гупало О. С. Радонова безпека житлових будівель : підруч. для студ. вищих навчальних закладів з грифом МОН (№ 14/18-Г-1583 від 03.07.2008 р.). Дніпропетровськ, 2008 р. 313 с.
4. Капля О. І., Беліков А. С., Пилипенко О. В. Аналіз нормативно-правової бази у сфері охорони та фізичного захисту особовим складом ВВО ДП «38 ВІТЧ» режимної території колишнього уранового виробництва ВО «ПХЗ». *Вісник ПДАБА*. 2010. № 8. 41–44 с.
5. Беликов А. С., Пилипенко А. В., Степанова А. В., Вишне夫斯基 А. С. Оценка радиационной опасности согласно рекомендациям международной комиссии по радиационной защите. *Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. трудов*. Вып. 80. 2015. С. 55–60.
6. Pylypenko O., Karasev O., Rybalka K., Kreknin K. Radiation safety status in the housing estate Peremoha-2 in Dnipro city. *The scientific heritage*. № 78, vol. 1. Budapest, Hungary, 2021. Pp. 29–34. DOI: 10.24412/9215- 0365-2021-78-1-29-34; URL: <https://goo.su/1911Eb>
7. Пилипенко О. В., Саньков П. М., Дзюбан О. В., Папірник Р. Б., Ткач Н. О. Особливості організації радіаційного контролю на об'єктах ядернопаливного комплексу України. *InterConf (124): sc. coll. of the Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference "Scientific horizon in the context of social crises"*. Tokyo, Japan : Otsuki Press, 2022. 207 p. URL: <https://archive.interconf.center/index.php/conferenceproceeding/article/view/1316>

REFERENCES

1. *Ofitsiynyy sayt Mizhnarodnoyi komisiyi z radiatsiynoho zakhystu* [International Commission on Radiological Protection]. URL: <http://www.ICRP.org> (in Ukrainian).

2. *Normy radiatsiyanoi bezpeky Ukrainy (NRBU-97) vid 14.07.1997 r.* [Radiation safety standards of Ukraine (NRBU-97) on 14.07.1997]. No. 208, Kyiv : MOZ publ., 1997. (in Ukrainian).

3. Sokolov I.A., Zaprudin V.F., Belikov A.S., Pylypenko O.V., Savitsky M.V. and Gupalo O.S. *Radonova bezpeka zhytlovykh budivel' : pidruchnyk dlya studentiv vyshchyykh navchal'nykh zakladiv z hryfom MON* [Radon safety of living standards : a handbook for students of higher initial knowledge with the stamp of the Ministry of Education and Science]. No. 14/18-Г-1583 on 03.07.2008, Dnipropetrovsk, 2008, 313 p. (in Ukrainian).

4. Kaplya O.I., Belikov A.S. and Pylypenko O.V. *Analiz normatyvno-pravovoyi bazy u sferi okhorony ta fizychnoho zakhystu osobovym skladom VVO DP "38 VITCH" rezhyimnoi terytoriyi kolyshn'oho uranovoho vyrobnytstva VO "PKHZ"* [Analysis of the regulatory framework in the field of protection and physical protection by the personnel of VVO DP "38 VITCH" of the regime territory of the former uranium production of the PO "PHZ"]. *Visnyk PDABA* [Bulletin of the PSACEA]. 2010, no. 8, 41–44 p. (in Ukrainian).

5. Bielikov A.S., Pylypenko A.V., Stepanova A.V. and Vyshnevsky A.S. *Otsenka radiatsionnoy opasnosti soglasno rekomendatsiyam mezhdunarodnoy komissii po radiatsionnoy zashchite* [Assessment of radiation hazard according to the recommendations of the International Commission on Radiological Protection]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye: sb. nauchn. trudov* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. Vol. 80, 2015, pp. 55–60. (in Ukrainian).

6. Pylypenko O., Karasev O., Rybalka K. and Kreknin K. Radiation safety status in the housing estate Peremoha-2 in Dnipro city : the scientific heritage. Budapest, Hungary, 2021, no. 78, vol. 1, pp. 29–34. DOI: 10.24412/9215- 0365-2021-78-1-29-34; URL: <https://goo.su/1911Eb>

7. Pylypenko O.V., Sankov P.M., Dzyuban O.V., Papirnyk R.B. and Tkach N.O. *Osoblyvosti orhanizatsiyi radiatsiyoho kontrolyu na ob"yektakh yadernopalivnoho kompleksu Ukrainy* [Peculiarities of the organization of radiation control at the facilities of the nuclear fuel complex of Ukraine]. InterConf : scientific collection of the Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference "Scientific horizon in the context of social crises". Tokyo, Japan: Otsuki Press, 2022, 207 p. URL: <https://archive.interconf.center/index.php/conferenceproceeding/article/view/1316> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 15.12.2024.

УДК 622.834.5:614.8.01

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.117.1136

ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ ВІБРОАКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ

ЯЛАНСЬКИЙ О. А.¹, канд. техн. наук, доц.,
КИРИЧЕНКО О. В.², докт. техн. наук, проф.,
СЛАЩОВА О. А.^{3*}, канд. техн. наук, с. н. с.,
БАРАБАНОВ С. С.⁴, канд. техн. наук, ас.,
БРІЖЕНЮК В. С.⁵, магістр, асп.

¹ Кафедра електропривода, НТУ «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 744-62-19, e-mail: yalanskiy.o.a@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8761-275X

² Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, вул. Онопрієнка, 8, 18034, Черкаси, Україна, тел. +38 (093) 225-07-78, e-mail: okskir@meta.ua, ORCID ID: 0000-0002-0240-1807

^{3*} Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська 2-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 746-01-51, e-mail: OASlashchova@nas.gov.ua, ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

⁴ Кафедра охорони праці та цивільної безпеки, НТУ «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 744-62-19, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X

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) 756-34-73, e-mail: volodimirbrizenuk@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-9690-1056

Анотація. *Постановка проблеми.* Основна тенденція розвитку технології віброакустичного контролю геотехнічних об'єктів спрямована на автоматизацію отримання, передачі, збирання та обробки інформації. Однак, потребують подальшого розвитку математичний апарат та алгоритми для цифрової обробки віброакустичних сигналів. *Мета дослідження.* Визначення особливостей та розробка алгоритмів реалізації методу спектрального аналізу даних для віброакустичного контролю безпеки функціонування геотехнічної системи. *Методика.* Аналіз та узагальнення даних, аналітичні та лабораторні дослідження осцилограм акустичних сигналів, методи побудови цифрових систем контролю середовища. *Результати.* Досліджено методи і алгоритми, що використовуються в системах контролю стану порід, гірничих виробок, заглиблених і наземних споруд. Алгоритми цифрової обробки сигналів, як правило, включають фільтрацію та спектральний аналіз вхідних даних. Визначені особливості реалізації методу спектрального аналізу для обробки даних віброакустичного контролю функціонування геотехнічної системи. Встановлено, що загасаючий аперіодичний сигнал можна розглядати як суперпозицію добутків уявних періодичних сигналів та зміщених одиничних прямокутних імпульсів з тривалостями, що дорівнюють періодам відповідних періодичних сигналів. При цьому, частота першої моди коливань обернено пропорційна подвійній товщині досліджуваних елементів геотехнічної системи. Для контролю характеристик імпульсних акустичних сигналів, на відміну від відомого раніше методу, де використовується одне вимірювання протягом інтервалу розбиття та ручна побудова полів точок, пропонується використовувати серії точок на кожному з інтервалів часу зміни сигналу та проводити аналіз співвідношень між спектром реального аперіодичного сигналу та спектрами його уявних періодичних складових. Розроблено алгоритми автоматичного аналізу спектрограм віброакустичного відгуку для обчислень параметрів контролю методом дискретних ординат. Реалізація методу виконується шляхом послідовної циклічної обробки сигналу від високих частот до низьких з подальшим розбиттям на часові інтервали, в межах кожного з яких зміна значення відхилення приймається за період мнимого незагасаючого коливального процесу. *Наукова новизна.* Подальший розвиток отримав метод цифрової обробки одиничних акустичних імпульсів, що відрізняється розробленими алгоритмами автоматичного спектрального аналізу віброакустичного відгуку які оптимізовані для обчислень параметрів контролю методом дискретних ординат. *Практична значимість.* Результати досліджень дозволяють автоматизувати моніторинг складових геотехнічної системи на основі спектрів виділених періодичних складових віброакустичного відгуку досліджуваного об'єкта.

Ключові слова: безпека геотехнічних об'єктів; віброакустичний контроль; спектральний аналіз сигналу; алгоритми цифрової обробки

FEATURES OF IMPLEMENTATION OF THE SPECTRAL ANALYSIS METHOD FOR PROCESSING VIBROACOUSTIC CONTROL DATA

YALANSKYI O.A.¹, *Ph. D. (Tech), Assoc. Prof.*,
KYRYCHENKO O.V.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
SLASHCHOVA O.A.^{3*}, *Ph. D. (Tech.), Sen. Res.*,
BARABANOV S.S.⁴, *Ph. D. (Tech.), Ass. Prof.*,
BRIZHENIUK V.S.², *Master of Sc., Postgrad. Stud.*

¹ Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 744-62-19, e-mail: yalanskiy.o.a@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8761-275X

² Department of Fire Prevention, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes National University of Civil Defense of Ukraine, 8, Onopriyenko St., Cherkasy, 18034, Ukraine, tel. +38 (093) 225-07-78, e-mail: okskir@meta.ua, ORCID ID: 0000-0002-0240-1807

^{3*} Department of Mining at Great Depths, the M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Sympheropolska Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 746-01-51, e-mail: OASlashchova@nas.gov.ua, ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

⁴ Department of Labour Protection and Civil Safety, Dnipro University of Technology, 19, D. Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 744-62-19, e-mail: stanislavbarabanov5@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9236-022X

⁵ 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: volodimirbrizenuk@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-9690-1056

Abstract. Problem statement. The main trend in the development of vibroacoustic technology for monitoring geotechnical objects is aimed at automating the receipt, transmission, collection and processing of information. However, the mathematical apparatus and algorithms for digital processing of vibroacoustic signals require further development. **Purpose of the study.** Definition of features and development of algorithms for the implementation of the spectral analysis method for vibroacoustic monitoring of the geotechnical system functioning safety. **Methods.** Analysis and generalization of data, analytical and laboratory studies of acoustic signals oscillograms, methods for constructing digital environmental control systems. **Research results.** The methods and algorithms used in systems for monitoring the state of rocks, mine workings, underground and surface structures are investigated. Digital signal processing algorithms usually include filtering and spectral analysis of input data. The features of the spectral analysis method implementation for processing vibroacoustic monitoring data of a geotechnical system are determined. It is established that a decaying aperiodic signal can be considered as a superposition of multiplications of imaginary periodic signals and shifted single rectangular pulses. In this case, the frequency of the first oscillation mode is inversely proportional to the double thickness of the studied elements of the geotechnical system. To control the characteristics of pulsed acoustic signals, in contrast to the previously known method, which uses one measurement during the partition interval and manual construction of point fields, it is proposed to use a series of points at each of the time intervals of signal change and analyze the relationships between the spectrum of the real aperiodic signal and the spectra of its imaginary periodic components. Algorithms for automatic analysis of vibroacoustic response spectrograms and calculating control parameters using the discrete ordinate method are developed. The method is implemented by sequential cyclic processing of the signal from high frequencies to low frequencies, followed by division into time intervals, within each of which the change in the deviation value is taken as the period of the unquenchable oscillatory process. **Scientific novelty.** The methodology for identifying hidden damage in structural elements of buildings and structures has been further developed, which is distinguished by taking into account the parameters of vibroacoustic control of the destruction consequences and assessing the risks of the structures stability loss. **Practical significance.** The research results make it possible to improve the method for assessing changes in the structure of the medium as a result of the occurrence of observed and hidden systems of cracks using vibroacoustic monitoring.

Keywords: *geotechnical facilities safety; vibroacoustic monitoring; spectral signal analysis; digital processing algorithms*

Постановка проблеми.

Сучасні наукові та інженерні задачі вимагають високої точності, швидкості і надійності обробки даних, що особливо актуально для віброакустичного методу [1–3]. Цей метод використовується для неруйнівного контролю та діагностики

стану конструкцій, матеріалів і гірських порід [4; 5]. Необхідність автоматизації віброакустичного методу полягає в тому, що акустичні сигнали дуже складні, мають багатокомпонентний характер і схильні до впливу шуму, перешкод та нелінійних ефектів, що потребує застосування складних

математичних методів обробки. Складність обробки даних, в свою чергу, вимагає мінімізації помилок та виключення людського фактора (некомпетентності, втоми, неуважності) при інтерпретації результатів [6]. Автоматизовані системи забезпечують стандартизований підхід, який знижує ймовірність суб'єктивних чи випадкових помилок.

Використання віброакустичного методу для моніторингу стійкості споруд передбачає збільшення кількості досліджень, що неминуче призводить до зростання об'єму даних. Ручна обробка таких масивів даних стає неможливою, особливо з урахуванням вимог до часу і якості виконання робіт. При цьому слід зазначити, що вітчизняні прилади розраховані переважно на ручну обробку результатів.

Таким чином, основна тенденція розвитку технології контролю і моніторингу геотехнічних об'єктів спрямована на автоматизацію отримання, передачі, збирання та обробки інформації. Разом із тим, потребують подальшого розвитку математичний апарат та алгоритмічне забезпечення для цифрової обробки віброакустичних сигналів.

Мета дослідження – визначення особливостей та розробка алгоритмів реалізації методу спектрального аналізу даних для віброакустичного контролю безпеки функціонування геотехнічної системи.

Результати досліджень.

Алгоритми цифрової обробки сигналів, що використовуються в системах автоматизованого контролю стану порід, гірничих виробок, заглиблених і наземних споруд, як правило, включають фільтрацію та спектральний аналіз. При цьому досліджують сигнали $\varphi(t)$, які, по-перше, задовольняють умовам Діріхле, і, по-друге, мають обмежену енергію, тобто

$\int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(t)|^2 dt \neq \infty$. Для функцій, що визначають

такі сигнали, існують пряме та зворотне перетворення Фур'є [7; 8], отже, можливе визначення їх спектра. Однак для автоматизації контролю стану підземних

споруд і породного масиву найчастіше використовується не безпосередньо спектр, а його похідні параметри, наприклад, такі як: відношення амплітуд або енергій сигналу у двох певних частотних смугах, коефіцієнт загасання конкретних гармонійних складових та ін. Це пов'язано в першу чергу з тим, що розмір вектора коефіцієнтів дискретного перетворення Фур'є збігається з розміром вектора миттєвих значень аналізованого сигналу.

Для приладів оперативного контролю та контролерів нижнього рівня автоматизованих систем необхідні методи та алгоритми цифрового перетворення сигналу з часової області на частотну, що забезпечує зменшення розміру вихідного вектора перетворення по відношенню до вхідного. Компактність вектора коефіцієнтів такого перетворення спрощує вибір параметрів, критеріїв контролю і оцінку вихідного сигналу на відповідність цим критеріям. Врахування особливостей імпульсних акустичних сигналів відгуку на ударний вплив дозволить підвищити точність та інформативність методів.

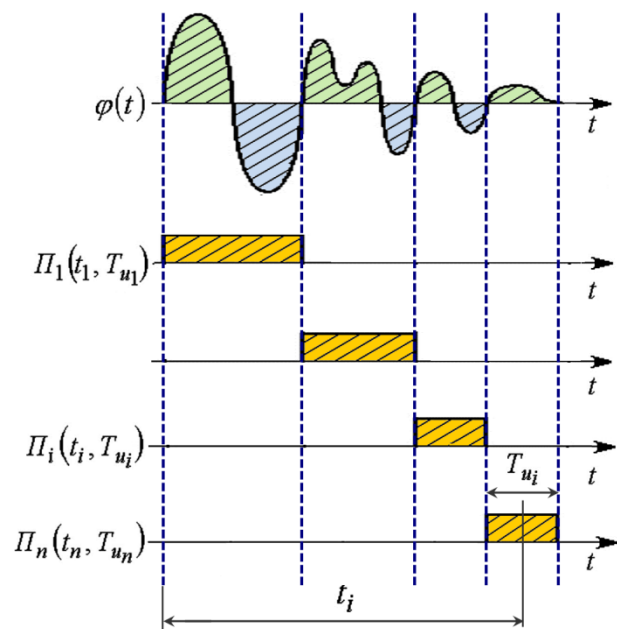


Рис. 1. Приклад розбиття віброакустичного сигналу на інтервали точками перетину з віссю абсцис для автоматизації контролю пошкодженості об'єкта в режимі реального часу

Загасаючий аперіодичний сигнал $\varphi(t)$ представимо як суперпозицію добутоків

періодичних сигналів $\varphi_{pi}(t)$ на одиничні прямокутні імпульси $\Pi_i(t_i, T_{ui})$ (рис. 1):

$$\varphi(t) = \sum_i \varphi_{pi}(t) \cdot \Pi_i(t_i, T_{ui}), \quad (1)$$

де t_i – момент часу, що відповідає середині i -го прямокутного імпульсу, T_{ui} – його тривалість.

Оскільки перетворення Фур'є (ПФ) є лінійним перетворенням, то ПФ для лінійної комбінації деяких функцій $\varphi_i(t)$ дорівнює аналогічній лінійній комбінації перетворень Фур'є цих функцій:

якщо $\varphi_i(t) \leftrightarrow \Phi_i(f)$,

то
$$\sum_{i=1}^n a_i \varphi_i(t) \leftrightarrow \sum_{i=1}^n a_i \Phi_i(f), \quad (2)$$

де $\varphi_i(t)$ – функція, що задовольняє умовам Діріхле, $\Phi_i(f)$ – її перетворення Фур'є, a_i – постійний коефіцієнт.

Відповідно до (2) для формули (1) буде справедливим такий вираз:

$$\varphi(t) \leftrightarrow \Phi(f) = \sum_i \Phi_{(p\Pi)_i}(f), \quad (3)$$

де $\Phi_{(p\Pi)_i}$ – перетворення Фур'є добутку, що стоїть під знаком суми (3) i -ої періодичної функції, помноженої на прямокутний імпульс:

$$\varphi_{pi}(t) \cdot \Pi_i(t_i, T_{ui}) \leftrightarrow \Phi_{(p\Pi)_i}(f).$$

Відома властивість перетворення Фур'є, згідно з якою ПФ добутку двох функцій $\varphi_1(t) \cdot \varphi_2(t)$ дорівнює їх згортці:

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) \cdot \varphi_2(t) &\leftrightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_1(f') \Phi_2(f - f') df' = \\ &= \Phi_1(f) * \Phi_2(f). \end{aligned} \quad (4)$$

Якщо $\varphi_{pi}(t) \leftrightarrow \Phi_{pi}(f)$, $\Pi_i(t_i, T_{ui}) \leftrightarrow \Phi_{\Pi_i}(f)$, то відповідно до (1) і (4) формулу (3) можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} \varphi(t) \leftrightarrow \Phi(f) &= \sum_i \Phi_{(p\Pi)_i}(f) = \\ &= \sum_i \Phi_{pi}(f) * \Phi_{\Pi_i}(f). \end{aligned} \quad (5)$$

Оскільки для кожного i -го прямокутного імпульсу справедливий вираз

$$\begin{aligned} \Phi_{\Pi_i}(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} \Pi_i(t_i, T_{ui}) e^{-j2\pi ft} dt = \\ &= \int_{\frac{-T_{ui}-t_i}{2}}^{\frac{T_{ui}-t_i}{2}} e^{-j2\pi ft} dt = e^{j2\pi ft_i} \frac{\pi T_{ui}}{\pi f} \end{aligned}$$

то формулу (5) можна представити як:

$$\begin{aligned} \varphi(t) \leftrightarrow \Phi(f) &= \sum_i \Phi_{(p\Pi)_i}(f) = \\ &= \sum_i \Phi_{pi}(f) * e^{j2\pi ft_i} \frac{\pi T_{ui}}{\pi f}. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким чином, спектр вихідного аперіодичного сигналу однозначно пов'язаний зі спектрами уявних періодичних коливань $\varphi_{pi}(t)$. Можна зробити висновок, що спектр імпульсного сигналу реакції блокової або плоскопаралельної структури контрольованого підземного об'єкта на збуджуючий ударний вплив, є сумою кінцевого числа згортки прямих перетворень Фур'є уявних періодичних сигналів і зміщених одиничних прямокутних імпульсів. При цьому, критична частота першої моди коливань обернено пропорційна подвійній товщині структури, що дозволяє автоматизувати контроль об'єкта в режимі реального часу з урахуванням спектрів виділених періодичних сигналів.

Розглянувши коливання будь-якої частинки пород або споруди, що віддалена на певну відстань x від точки впливу імпульсної сили при ударнохвильовому контролі, можна констатувати – до того, як передній фронт надійде, частинка знаходиться в спокої. У момент часу t_1 , визначений швидкістю розповсюдження хвилі в масиві, частинка входить у вібраційний рух [9], який характеризується наступними параметрами:

- амплітудами коливань $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots$ у моменти часу $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$ відповідно;
- періодом T_i частотою $f = 1/T$ коливань;

– ослабленням хвилі (зменшенням амплітуди A_i) за час t_i або вздовж лінії просування по області, рівній довжині хвилі λ .

Поширення хвиль у тілі споруд і породах відбувається відповідно до законів геометричної оптики, тобто на межах розділу та неоднорідностей, хвилі відбиваються, заломлюються і розсіюються. Таким чином, амплітудні характеристики акустичних імпульсів несуть інформацію

про стан підземного об'єкту, просторову структуру та напружено-деформований стан породного масиву.

Відомі методи аналізу отриманих осцилограм акустичних сигналів [9; 10] представляють собою визначення максимальної амплітуди A (рис. 2) та коефіцієнта затухання коливань, обчислення співвідношення максимальних амплітуд у заданих інтервалах частот або в різних вимірювальних каналах.

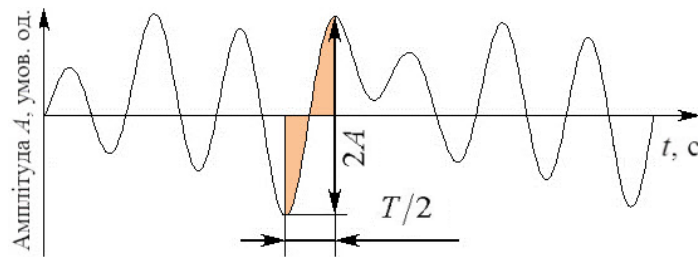


Рис. 2. Визначення максимального значення подвійної амплітуди та відповідного періоду

Для більш детального контролю характеристик імпульсних акустичних сигналів у мікропроцесорних пристроях оперативного контролю та нижчого рівня автоматизованих систем пропонується застосувати метод на основі аналізу візуальних або умовних спектрів. Для їх отримання виконують дискретні

вимірювання амплітуд та періодів умовних коливань з інтервалами часу, що дорівнюють відповідним періодам. Далі, визначають частоти цих коливань, і поле точок, що є основою для побудови умовного спектру. Як правило використовується одне вимірювання протягом інтервалу розбиття та ручна побудова полів точок (рис. 3).

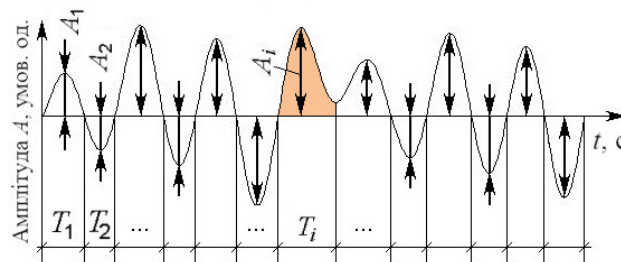


Рисунок 3. Дискретна обробка амплітуд та періодів (апроксимація напівхвилями синусоїд)

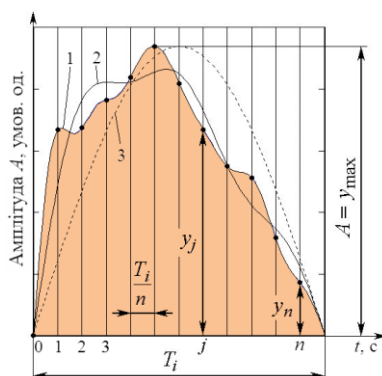


Рис. 4. Визначення n коефіцієнтів ряду на кожному i -му інтервалі амплітуд та частот хвильового процесу (уточнена апроксимація n 'ятьма гармоніками)

На відміну від відомого раніше методу пропонується метод, в якому зміна сигналу на кожному з інтервалів часу виражається серією точок (рис. 4). Якщо відомий спосіб базується на кореляційному зв'язку між реальним та апроксимованим ділянками синусоїд сигналів, то в запропонованому методі використовується співвідношення між спектром реального аперіодичного сигналу та спектрами його умовних періодичних складових (6). Таким чином, контрольований сигнал (графік 1, рис. 4) апроксимується не напівхвилями синусоїд (графік 3, рис. 4), а ділянками кривих

(графік 2, рис. 4), що містять по п'ять гармонійних складових, що дає більш високу точність наближення.

Для розбиття сигналу на ділянки та виділення уявних періодичних складових запропоновано порівнювати поточне миттєве значення сигналу зі значеннями

зони нечутливості $A_0 - \Delta TG$ (нижня уставка) та $A_0 + \Delta TG$ (верхня уставка), де A_0 – постійна складова оцифрованого сигналу (як правило, дорівнює величині зміщення аналого-цифрового перетворювача), $2\Delta TG$ – ширина зони нечутливості (рис. 5).

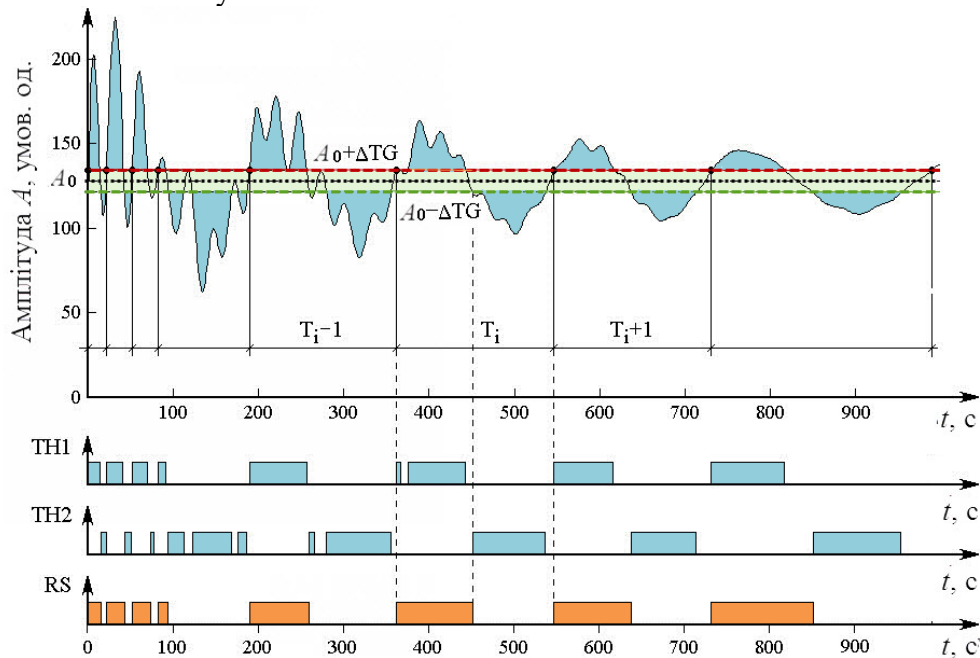


Рис. 5. Реалізація методу перетворення та цифрової обробки аперіодичного віброакустичного відгуку на ударний вплив за допомогою мікроконтролерів

Якщо в систему автоматизації інтегрувати програмні компаратори (ТН1 і ТН2, рис. 5), то вони встановлюються в одиничний стан у разі перевищення чи зниження уставки. Компаратор ТН2 встановлюється в одиничний стан, якщо значення цифрового коду менше від нижньої уставки. Якщо виходить компараторів підключаються до входів програмного тригера, то початок кожного нового i -го інтервалу, рівного періоду виділеної періодичної складової, визначається фронтом вихідного сигналу тригера.

Якщо розглянути гармонічний склад виділених періодичних складових сигналу відповідно до співвідношення (6), у ряді випадків можна спростити алгоритми цифрової обробки акустичних імпульсів відгуку на ударний вплив і тим самим здешевити автоматизацію контролю, зменшивши вимоги до продуктивності

елементної бази контролерів нижнього рівня автоматизованих систем.

Зокрема, можна відмовитись від застосування сигнальних процесорів на користь мікроконтролерів загального призначення. Таке рішення особливо ефективно у цифрових приладах оперативного контролю.

Сформульований висновок та розроблений на його основі метод дозволяють окремо послідовно розглядати гармонічний склад поздовжньої передхвилі, поперечних резонансних мод та згинальних низькочастотних коливань (рис. 6). Для спектрального розкладання уявних періодичних складових коливань застосовується метод дискретних ординат, що в сукупності із запропонованим методом дозволяє уникнути операцій над комплексними числами та звести обчислення в основному до цілісночисельного підсумовування.

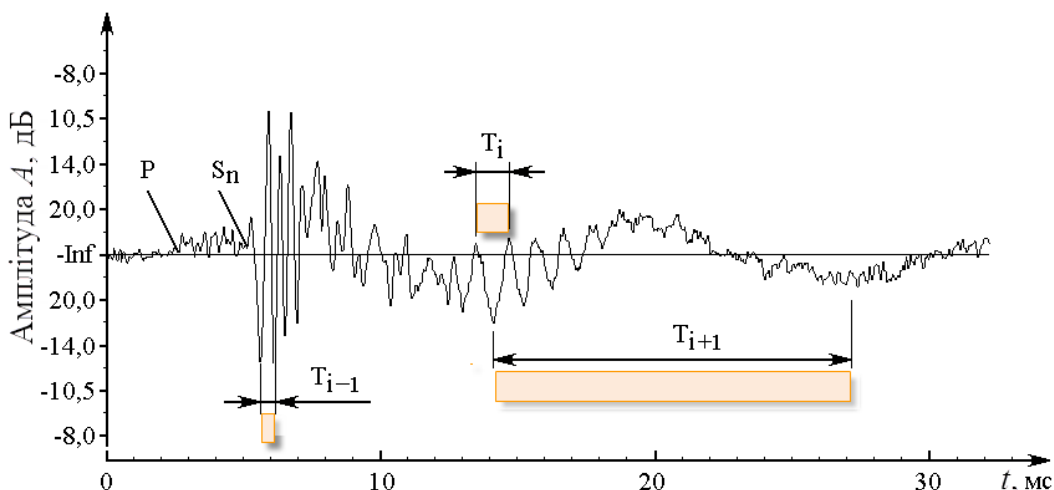


Рис. 6. Визначення інформативних частот $f_i = 1/T$ в одиничних акустичних імпульсах при ударному впливі

Розглянемо особливості реалізації швидкого перетворення Фур'є методом дискретних ординат для обробки даних автоматизованого віброакустичного контролю в двійковому коді.

При використанні методу дискретних ординат функцію $f(x)$ представимо у вигляді кінцевого ряду:

$$y = f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^6 a_i \cos ix + \sum_{i=1}^5 b_i \sin ix, \quad (3.7)$$

де a_0 постійна складова, i – номер гармонійної складової; a_i, b_i – коефіцієнти ряду Фур'є.

Оскільки у цифрових приладах оперативного контролю та контролерів нижнього рівня автоматизованих систем обробка даних виконується мікропроцесорними засобами [11; 12], то раніше відомий метод перероблено для обчислень у двійковому коді.

Значення коефіцієнтів ряду визначаються за формулами:

$$a_0 = \frac{1}{12}(r_0 + l); \quad a_1 = \frac{1}{6} \left(v_0 + \frac{\sqrt{3}}{2} s_1 + \frac{1}{2} s_2 \right);$$

$$a_2 = \frac{1}{6} \left(s_0 + \frac{1}{2} m \right); \quad a_3 = \frac{1}{6} (v_0 - s_2);$$

$$a_4 = \frac{1}{6} \left(r_0 - \frac{1}{2} l \right); \quad a_5 = \frac{1}{6} \left(v_0 - \frac{\sqrt{3}}{2} s_1 + \frac{1}{2} s_2 \right);$$

$$a_6 = \frac{1}{12} (s_0 - m);$$

$$b_1 = \frac{1}{6} \left(v_3 + \frac{1}{2} p_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} p_2 \right); \quad b_2 = \frac{\sqrt{3}}{12} d;$$

$$b_3 = \frac{1}{6} (p_1 - v_3); \quad b_4 = \frac{\sqrt{3}}{12} h;$$

$$b_5 = \frac{1}{6} \left(v_3 + \frac{1}{2} p_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} p_2 \right), \quad (7)$$

де проміжні змінні $u_0, u_1, \dots, u_5; v_0, v_1, \dots, v_5; r_0, r_1, r_2; s_0, s_1, s_2; p_1, p_2; q_1, q_2; l, d, m, h$ розраховуються за наступною обчислювальною схемою:

u_0	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	Суми (u)
v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	Різниці (v)
u_0	u_1	u_2		v_1	v_2	[9, 11, 13 розрядів]
u_3	u_5	u_4		v_5	v_4	[10, 12, 14 розрядів]
r_0	r_1	r_2		p_1	p_2	Суми (r, p)
s_0	s_1	s_2		q_1	q_2	Різниці (s, q)
r_1	q_1					[10, 12, 14 розрядів]
r_2	q_2					
l	d					Суми (l, d)
m	h					Різниці (m, h)

Величини, які входять до остаточних формул, у цій схемі виділені напівжирним шрифтом. У квадратних дужках наведені розрядності абсолютних величин проміжних змінних при використанні 8-, 10- та

12-розрядних вхідних даних. Таким чином, максимальна розрядність цілочисельних змінних становить 15 біт, що дозволяє проводити проміжні обчислення над двобайтними операндами з використанням старшого 16-го розряду як знакового. Від’ємні числа подаються у додатковому коді.

Як видно з (7), у процесі обчислення деяких коефіцієнтів доводиться множити значення проміжних величин, розрахованих відповідно до наведеної обчислювальної схеми, на множник $\sqrt{3}/2$. При виконанні цієї дії цілочисельні проміжні величини перетворюються на ірраціональний дріб. Для обчислень у двійковому коді множник $\sqrt{3}/2$ замінимо числом обмеженої точності 0,8671875. При цьому відносна помилка

становитиме 0,134 %. Усі подальші обчислення проводяться у двійковій формі без округлення чи відкидання значущих біт, тобто без втрати точності. Дробова частина множника $\sqrt{3}/2$ у цьому наближенні виражається одним байтом ($0,8671875d = ,DEh$), тому розрядність дробової частини добутку також становить 8 бітів. При цьому молодший значущий біт добутку буде завжди нульовим, тому що нулю дорівнює молодший біт множника $DEh = 1101110b$.

У зв'язку з вищесказаним обчислення за формулами (7) слід виконувати в трибайтному знаковому форматі (рис. 7, а), причому молодший байт повинен виражати дробову частину числа.

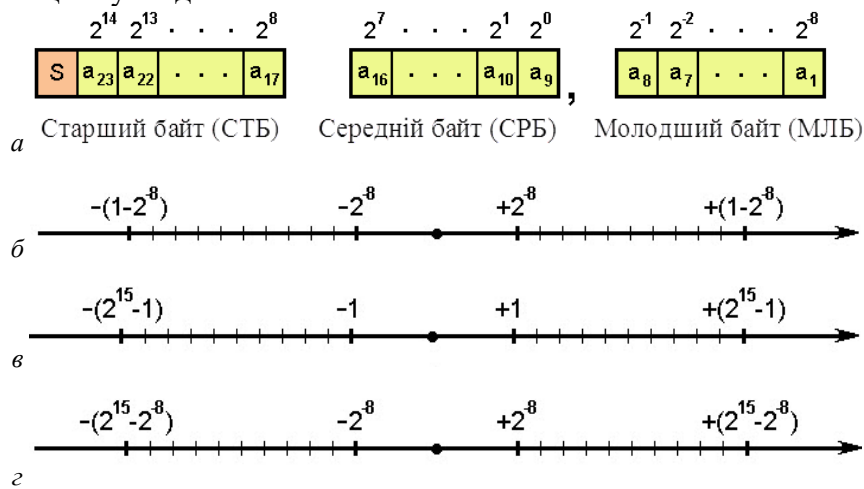


Рис. 7. Реалізація методу дискретних ординат для обробки даних віброакустичного контролю: а – трибайтний формат з фіксованою комою; б, в, г – діапазон дробової, цілої та суміщеної частин, відповідно

Таблиця 1

Діапазони зміни добутків коефіцієнтів ряду (6) на масштабний коефіцієнт $m_k = 6$

Коефіцієнт	$m_k \cdot a_0$	$m_k \cdot a_1$	$m_k \cdot a_2$	$m_k \cdot a_3$	$m_k \cdot a_4$	$m_k \cdot a_5$
Діапазон зміни	0... +5FFA'00h	±3BBC'44h	±3FFC'00h	±2FFD'00h	±3FFC'00h	±3BBC'44h
Коефіцієнт	$m_k \cdot b_5$	$m_k \cdot b_1$	$m_k \cdot b_2$	$m_k \cdot b_3$	$m_k \cdot b_4$	$m_k \cdot a_6$
Діапазон зміни	±3BBC'44h	±3BBC'44h	±377C'88h	±2FFD'00h	±377C'88h	±2FFD'00h

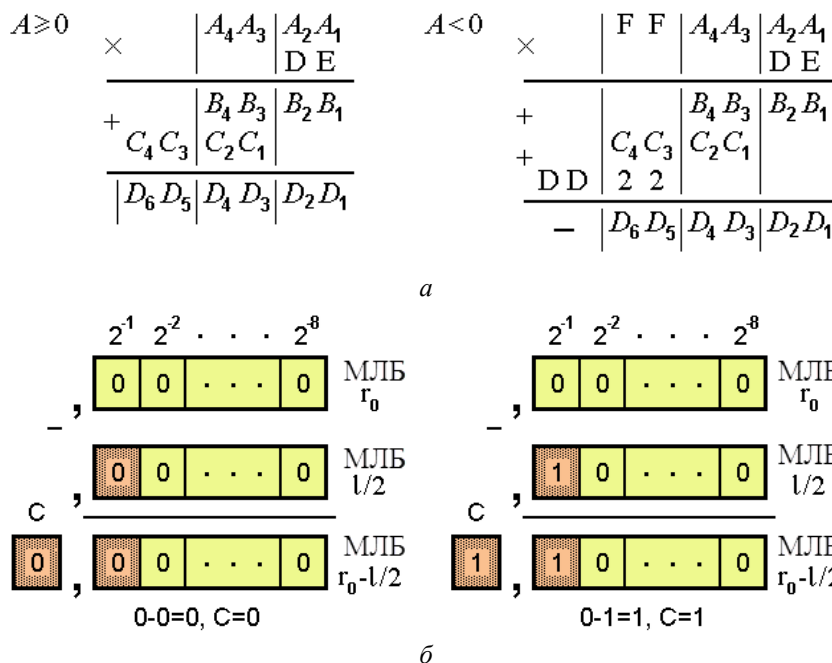
Розміщення чисел, що входять у діапазон, який визначається цим форматом, на числовій осі показано на рисунку 7, б. З метою прискорення обробки даних у режимі реального часу слід обчислювати значення коефіцієнтів ряду (6), помножених на масштабний коефіцієнт $m_k = 6$.

У таблиці 1 наведено діапазони зміни величин $m_k \cdot a_0, m_k \cdot a_1, \dots, m_k \cdot a_6; m_k \cdot b_1, m_k \cdot b_2, \dots, m_k \cdot b_5$ при максимальній розрядності зміщених вихідних даних. Як видно з таблиці, будь-які можливі значення коефіцієнтів ряду (6) входять до діапазону чисел, який визначається прийнятим

трибайтним знаковим форматом (рис. 7). Знаком апострофа (‘) у таблиці відокремлені молодші байти, що виражають дробову частину чисел.

Перший етап операції множення двобайтного знакового числа на однобайтний позитивний множник $0,8671875d$ виконується за стандартним алгоритмом побайтним перемноженням, причому при роботі над старшим байтом

його знак зберігається в біті користувача. Після отримання модуля добутку у разі від’ємного множника до старшого байта результату додається $022h$ (рис. 8, а) і тим самим формується додатковий код результату в прийнятому трибайтному форматі [13]. Таким чином, стандартний алгоритм множення оптимізований для конкретного значення множника, форматів операндів та результату.



X_i – тетрада числа X ; $X_{i+1}X_i$ – байт числа X ; $A_4A_3A_2A_1$ – множинне; $0DEh = .8671875d$ – множник; $B_4B_3B_2B_1 = A_2A_1 \times 0DEh$; $D_6D_5D_4D_3D_2D_1$ – добуток у додатковому коді (МЛБ – дробова частина).

Рис. 8. Формування додаткового коду результату в прийнятому трибайтному форматі: а – множення двобайтного множника; б – формування молодшого байта результату

Наприклад, при використанні 12-розрядних вихідних даних модуль величини r_0+l виражається двома байтами, тобто відбувається заповнення біта знака. Тому, залежно від використовуваної розрядності N вихідних даних, змінюється алгоритм розрахунку коефіцієнта a_0 :

- при $N < 12$ заповнення знакового біта не відбувається і розрахунок проводиться за формулою $m_k a_0 = 0,5(r_0 + l)$;

- при $N = 12$ застосовується формула $m_k a_0 = 0,5r_0 + 0,5l$.

Обидві формули дають однаковий результат, але в останньому випадку перед додаванням проводиться зменшення розрядності цілої частини кожного з

доданків на один біт, що запобігає заповненню біта знака.

Дане рішення застосовується і для обчислення коефіцієнта a_6 :

- при $N < 12$ $m_k a_6 = 0,5(s_0 - m)$;

- при $N = 12$ $m_k a_6 = 0,5s_0 - 0,5m$.

Таким чином, подальший розвиток отримав метод цифрової обробки одиничних акустичних імпульсів, що відрізняється алгоритмами автоматичного аналізу спектрограм віброакустичного відгуку методом дискретних ординат шляхом циклічної обробки сигналу, розбиттям на часові інтервали, в межах кожного з яких зміна значення відхилення приймається за

період уявного незагасаючого коливального процесу.

Висновки

1. Визначені особливості реалізації методу спектрального аналізу для обробки даних віброакустичного контролю функціонування геотехнічної системи. Встановлено, що загасаючий аперіодичний сигнал можна розглядати як суперпозицію добутків уявних періодичних сигналів на зміщені одиничні прямокутні імпульси з тривалостями, рівними періодам відповідних періодичних сигналів. Спектр такого сигналу є сумою згорток прямих перетворень Фур'є уявних періодичних сигналів і прямокутних імпульсів. При цьому, критична частота першої моди коливальних обернено пропорційна подвійній товщині досліджуваних елементів геотехнічної системи, що дозволяє автоматизувати контроль на основі спектрів виділених періодичних складових.

2. Для контролю характеристик імпульсних акустичних сигналів пропонується застосувати аналіз візуальних або умовних спектрів. На відміну від відомого раніше методу, де використовується одне вимірювання

протягом інтервалу розбиття та ручна побудова полів точок (базується на кореляційному зв'язку між реальним та апроксимованим ділянками синусоїд сигналів), пропонується використовувати серії точок на кожному з інтервалів часу зміни сигналу та проводити аналіз співвідношень між спектром реального аперіодичного сигналу та спектрами його уявних періодичних складових.

3. Подальший розвиток отримав метод цифрової обробки одиничних акустичних імпульсів, що призначений для автоматизації віброакустичного контролю за допомогою мікропроцесорних засобів. Метод відрізняється розробленими алгоритмами автоматичного аналізу спектрограм віброакустичного відгуку які оптимізовані для обчислень параметрів контролю методом дискретних ординат. Реалізація методу виконується шляхом послідовної циклічної обробки сигналу від високих частот до низьких з подальшим розбиттям на часові інтервали, в межах кожного з яких зміна значення відхилення приймається за період мнимого незагасаючого коливального процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Yalanskyi O. A., Bielikov A. S., Varabanov S. S., Slashchova O. A., Ikonnikov M. Yu. Identification of geomechanical and geotechnical structures using the vibroacoustic method for automated stability monitoring systems of ground buildings and mine workings. *Journal of Donetsk Mining Institute*. 2023. № 2 (53). Pp. 101–109.
2. Бєлікєв А. С., Яланський О. А., Барабанєв С. С., Слещєва О. А., Іконніков М. Ю. Розробка моделей складних коливальних для систем автоматизації віброакустичного контролю безпеки експлуатації будівель і споруд. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 3 (021). С. 7–18.
3. Slashchova O., Yalanskyi O., Slashchov I., Kurinnyi V. and Kulbach A. Fuzzy logic methods for risk management at mining enterprises. *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.* 2023. Vol. 1156. P. 012015.
4. Slashchov I., Bielikov A., Kulbach A., Slashchova O. Forecasting the risks of the mine roadway destruction by the radiometric control method. *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.* 2023. Vol. 1156. P. 012033.
5. Булат А. Ф., Слещєва О. А., Слещєв І. М., Стаднійчук М. М. Обґрунтування методів контролю геомеханічної безпеки на гірничих підприємствах. *Геотехнічна механіка*. 2020. № 150. С. 176–187.
6. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I., Siromaschenko I. Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 970. P. 012010.
7. Walker J. S. *Fast Fourier Transforms*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press. 1996. 464 p. ISBN 978-0849371639.
8. Wilson R. G. *Fourier Series and Optical Transform Techniques in Contemporary Optics*. New York : Wiley, 1995. 344 p. ISBN 978-0-471-30357-2.
9. Bajic Branko Methods for vibro-acoustic diagnostics of turbine cavitation. *Journal of Hydraulic Research*. 2003. № 41. Pp. 87–96.
10. Мандзій Б. А., Желяк Р. І. Основи теорії сигналів : навч. посіб. За ред. Б. А. Мандзія. Львів : ЛДКФ "АТЛАС", 2003. 152 с.
11. Gabriele D'Antona, Alessandro Ferrero. Digital signal processing for measurement systems: theory and applications. *Springer Science & Business Media*. 2006. Pp. 33–55.

12. Mishra S. C., Roy H. K., Misra N. Discrete ordinate method with a new and a simple quadrature scheme. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2006. № 101 (2). Pp. 249–262.

13. Ткачов В. В., Яланський О. А. Реалізація швидкого перетворення Фур'є методом дванадцяти ординат за допомогою однокристальних мікроконтролерів. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 1999. № 3 (62). С. 61–67.

REFERENCES

1. Yalanskyi O.A., Bielikov A.S., Barabanov S.S., Slashchova O.A. and Ikonnikov M.Yu. Identification of geomechanical and geotechnical structures using the vibroacoustic method for automated stability monitoring systems of ground buildings and mine workings. *Journal of Donetsk Mining Institute*. 2023, no. 2 (53), pp. 101–109. URL: <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-2-101-109>

2. Bielikov A.S., Yalanskyi O.A., Barabanov S.S., Slashchova O.A. and Ikonnikov M.Yu. *Rozrobka modeley skladnykh kolyvan' dlya system avtomatyzatsiyi vibroakustychnoho kontrolyu bezpeky ekspluatatsiyi budivel' i sporud* [Development of models complex oscillations for automation systems of vibroacoustic operational safety control of buildings and structures]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2024, no. 3 (021), pp. 62–72. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.7.1055> (in Ukrainian).

3. Slashchova O., Yalanskyi O., Slashchov I., Kurinnyi V. and Kulbach A. Fuzzy logic methods for risk management at mining enterprises. *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.* 2023, vol. 1156, p. 012015. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012015>

4. Slashchov I., Bielikov A., Kulbach A. and Slashchova O. Forecasting the risks of the mine roadway destruction by the radiometric control method. *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.* 2023, vol. 1156, p. 012033. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1156/1/012033>

5. Bulat A.F., Slashchova O.A., Slashchov I.M. and Stadnychuk M.M. *Obgruntuvannya metodiv kontrolyu heomekhanichnoyi bezpeky na hirnychyykh pidpryyemstvakh* [Substantiation of methods of geomechanical safety control in the mining enterprises]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2020, no. 150, pp. 176–187. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.150.176> (in Ukrainian).

6. Slashchov A., Yalanskyi O., Slashchov I. and Siromaschenko I. Development of methods and software algorithms for state forecast of the ultimate stressed rock massif. *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 970, p. 012010. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012010>

7. Walker J.S. *Fast Fourier Transforms*, 2nd ed. Boca Raton, FL : CRC Press, 1996, 464 p. ISBN 978-0849371639.

8. Wilson R.G. *Fourier Series and Optical Transform Techniques in Contemporary Optics*. New York : Wiley, 1995, 344 p. ISBN 978-0-471-30357-2.

9. Bajic Branko. Methods for vibro-acoustic diagnostics of turbine cavitation. *Journal of Hydraulic Research*. 2003, no. 41, pp. 87–96. URL: <https://doi.org/10.1080/00221680309499932>

10. Mandziy B.A. and Zhelyak R.I. *Osnovy teorii syhnaliv : navch. posibnyk; za red. B.A. Mandziya* [Fundamentals of Signal Theory. Ed. by B.A. Mandziy]. Lviv : “ATLAS” Publ., 2003, 152 p. URL: https://antibotan.com/file.html?work_id=111190 (in Ukrainian).

11. Gabriele D'Antona and Alessandro Ferrero. *Digital signal processing for measurement systems : theory and applications*. Springer Science & Business Media. 2006, pp. 33–55. URL: <https://doi.org/10.1007/0-387-28666-7>

12. Mishra S.C., Roy H.K. and Misra N. Discrete ordinate method with a new and a simple quadrature scheme. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2006, no. 101 (2), pp. 249–262. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2005.11.018>

13. Tkachev V.V. and Yalanskyi O.A. *Realizatsiya shvydkoho peretvorennya Fur'ye metodom dvanadtsyaty ordynat za dopomohoyu odnokystal'nykh mikrokontroleriv* [Implementation of fast Fourier transform by the method of twelve ordinates using single-chip microcontrollers]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka* [Mining Electromechanics and Automation]. 1999, no. 3 (62), pp. 61–67. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 10.12.2024.

УДК 550.34:551.243:550.835.2

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270225.128.1137

ON THE QUESTION OF DETERMINING THE ACTIVITY OF FAULT ZONES OF THE PRECAMBRIAN CRYSTALLINE FOUNDATION AT THE ZAPORIZHZHIA NPP SITE BASED ON RADON MEASUREMENTS

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.*,
BILYK V.V.⁶, *Postgrad. Stud., Res. Fellow*

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: 0000-0003-1287-666X

⁶Laboratory of Research of Nuclear and Thermal Power Plants, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +380 (63) 247-27-42, e-mail: kolemasakar@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4435-2388

Abstract. Problem statement. The completed studies were due to the post-Fukushima reassessment of the site's seismic hazard and seismic resistance at the Zaporizhzhia NPP (Nuclear Power Plant), considering changes in geotechnical conditions during the plant operation. And also, to increase its operational reliability and safety. The basis was the international requirements for nuclear safety and the IAEA Safety Standards Series no. SSG-9, the requirements of domestic and foreign standards for the design of earthquake-resistant atomic power plants. The highly specialized research was conducted firstly in the country and tested at the site of the Zaporizhzhia NPP, with further improvement of the methodology it is quite possible for the stated purposes at the sites of other nuclear power plants, especially those located in seismically active zones. **Purpose of the article.** The purpose of the article is to test the methodology for determining the degree of tectonic activity of previously assumed, and subsequently confirmed by drilling and geophysics, fault zones at the Zaporizhzhia NPP site based on monitoring of radon in groundwater. Also, in the future, justify the use of radonometry for accurate mapping of fault zones in igneous rocks of the Ukrainian Crystalline Massif. **Conclusions and results.** The authors analysed archival data on the geology and hydrogeology of the NPP site and data on the radon content in the groundwater of crystalline basement rocks. We described existing methods for collecting water samples for radon and testing them in laboratory conditions. The data obtained as a result of the monitoring of radon in groundwater indicate the absence of neo-tectonic activity of a natural character on the site of the geodynamic polygon. This site is immediately adjacent to the Zaporizhzhia NPP site, and primarily in the zone of the sublatitudinal fault uncovered by one of the wells and crossing the NPP site in the area of the fourth block. The result of comparative studies of radon volumetric activity (VAR) indicators in the aquifer's fissure-vein waters of the crystalline Precambrian basement during 2012–2015 was confirmation of the fundamental possibility of assessing the tectonic activity of fault zones of the geodynamic polygon at the Zaporizhzhia NPP when carrying out radon monitoring.

Keywords: NPP; geological structure; granitoids; radon; tectonic fault; radon meters; volumetric activity of radon

ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ РОЗЛОМНИХ ЗОН ДОКЕМБРІЙСЬКОГО КРИСТАЛИЧНОГО ФУНДАМЕНТУ МАЙДАНЧИКА ЗАПОРІЗЬКОЇ АЕС НА ОСНОВІ ВИМІРУ РАДОНУ

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.,
БІЛИК В. В.⁶, асп., н. с.

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: uluanovvu@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: 0000-0003-1287-666X

⁶ Лабораторія досліджень атомних та теплових електростанцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: kolemasakar@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4435-2388

Анотація. Постановка проблеми. Виконані дослідження були зумовлені постфукусімською переоцінкою сейсмічної небезпеки та сейсмостійкості майданчика розміщення Запорізької АЕС з урахуванням зміни геотехнічних умов у процесі експлуатації станції. Підставою були міжнародні вимоги щодо ядерної безпеки та рекомендації МАГАТЕ SSG-9, вимоги вітчизняних та зарубіжних норм проєктування сейсмостійких атомних станцій. Проведені вузькоспеціальні дослідження, вперше в країні випробувані на майданчику Запорізької АЕС, за подальшого вдосконалення методики цілком можливі для заявлених цілей і на майданчиках інших АЕС, особливо розташованих у сейсмоактивних зонах. **Мета статті.** Метою статті є апробація методики визначення ступеня тектонічної активності, передбачених раніше, а згодом підтверджених бурінням та геофізикою розломних зон майданчика Запорізької АЕС на основі моніторингу радону в підземних водах. А також у перспективі обґрунтування застосування радонометрів для точного картування розломних зон у вивержених породах Українського Кристалічного Масиву. **Висновки.** Проаналізовано архівні дані про геологію та гідрогеологію майданчика АЕС. Також проаналізовано дані про вміст радону в підземних водах кристалічних порід фундаменту. Описано існуючі методики відбору проб води на радон та їх досліджень у лабораторних умовах. Отримані в результаті проведення моніторингу радону в підземних водах дані свідчать про відсутність неотектонічної активності природного характеру на ділянці геодинамічного полігону, що безпосередньо прилягає до майданчика ЗАЕС і в першу чергу, в зоні субширотного розлому, розкритого однією зі свердловин та перетинає площину блоку. Результатом проведення протягом 2012–2015 років порівняльних досліджень показників об'ємної активності радону (ОАР) у водах водоносного горизонту тріщинно-жильних вод кристалічного докембрійського фундаменту стало підтвердження принципової можливості при здійсненні моніторингу радону оцінки тектонічної активності розломних зон геодинамічного полігону Запорізької АЕС.

Ключові слова: АЕС; геологічна будова; гранітоїди; радон; тектонічний розлом; радонометри; об'ємна активність радону

Formulation of the problem. Research, and the analysis of materials that had formed the basis of this article, were carried out in the period from 2012 to 2015. The topic of the research was “Performing instrumental

observations on a temporary seismic monitoring network and a geodynamic polygon in the area of the Zaporizhzhia NPP”.

The performed research was due to the post-Fukushima reassessment of the seismic

hazard and seismic resistance of the location site of the Zaporizhzhia NPP, considering changes in geotechnical conditions during the operation of the station, to increase its operational reliability and safety. The basis was international requirements for nuclear safety and IAEA Safety Standards Series № SSG-9, the requirements of domestic and foreign standards for the design of earthquake-resistant atomic power plants. The research was carried out following the Terms of Reference and the “Program for performing instrumental observations on a temporary seismic monitoring network and a geodynamic polygon in the area of the industrial site at the Zaporizhzhia NPP”.

The purpose of this article is to determine the degree of tectonic activity of fault zones at the nuclear power plant site identified by drilling and engineering geophysics based on radon monitoring. Radon is an integral part of a comprehensive study of the Earth’s hydro-geo-deformational field, which also includes research on the chemical composition of groundwater at the site of the geodynamic polygon at the Zaporizhzhia NPP.

The purpose of the article. The purpose of the article is to test the methodology for determining the degree of tectonic activity of previously assumed, and subsequently confirmed by drilling and geophysics, fault zones at the Zaporizhzhia NPP site based on monitoring of radon in groundwater. Also, in the future, justify the use of radonometry for accurate mapping of fault zones in igneous rocks of the Ukrainian Crystalline Massif.

Materials and Methods. *Radon in the fault zones of the crystalline rocks in Ukraine.*

On the territory of Ukraine, where there are hard-rocks outcrops, radon waters have been described in the Kyiv, Dnipropetrovsk, Zaporizhzhia, Zhytomyr, Kirovohrad, Donetsk, Cherkasy, and Vinnytsia regions. In these areas, located on the Ukrainian Crystalline Massif (UCM), groundwater is enriched with large amounts of radon. In particular, the average volumetric activity of radon is 261 Bq/l [0–3; 7–10]. For radioecological monitoring of the water state in underground sources of drinking water supply, the Zaporizhzhia

Regional Sanitary-Epidemic Station has been continuously monitoring the content of natural radionuclides in the water of artesian wells over the past 15 years. Over the past few years, 158 wells have been explored. Since the Zaporizhzhia region is located on four geological formations: the Ukrainian crystalline massif, the Azov ridge, the Konsko-Yalyn, and the Black Sea depressions, the research results were combined into four groups. Thus, the volumetric activity of radium in the UKM, Azov ridge, Konsko-Yalyn, and Black Sea depressions was, respectively, 0.41, 0.01, 0.04, 0.03 Bq/kg. The volumetric activity of radon in the UKM, Azov ridge, Konsko-Yalyn and Black Sea depressions was 48.2, 37.8, 15.5, 11.4 Bq/l, respectively.

The formation of anomalies of radioactive radon gas in covering deposits above faults served as a theoretical basis for the use of emanation (radon) surveys for mapping disjunctive breaks in closed areas. In the 70s of the last centuries, a new phenomenon was established – a direct connection between the intensity of radon anomalies and geodynamic processes in the earth's crust and fault zones. This phenomenon served as the basis for a new direction of research in geology – structural-geodynamic mapping (SGDM). Based on the above, the peculiarities in the behavior of ^{222}Rn in geological space create conditions for continuous monitoring of it as a geo-ecological indicator of the stressed state in the lithosphere. This is confirmed by abnormally high concentrations of ^{222}Rn in periods preceding earthquakes, unforeseen different gas emissions in coal mines, changes in the atmospheric electric-field strength and geological massif before landslide processes, and much more.

In recent years, more and more attention has been paid to the radon hazard in zones of influence of faults active in the modern era. This problem is very relevant for populated areas. It is known that the main entry of radon into residential premises comes from the soil under the building. In doing this, its maximum quantities are generated in geo-dynamically active zones of covering deposits associated with disjunctive breaks in bedrocks. The greatest danger is posed by those areas where

such ruptures are localized in shallow-lying granites. In many countries, sites for housing construction are examined for radon hazards, and possible sources and routes of radon entry into previously built houses are studied. In Ukraine, such research is at an early stage.

All of the above is also relevant for Ukraine, where increasing attention is being paid to the problem of identifying the so-called zones of environmental risk associated with disjunctive breaks in the earth's crust. A map of such regional-level zones for the territory of Ukraine has been constructed on a scale of 1:5.000.000. Researches of disjunctive breaks on a detailed scale are presented – within individual industrial districts, residential places, and local regions. At the same time, geodynamic zones associated with disjunctive breaks are identified in young sediments. The activity of such structures and their influence on the deformations of the earth's surface is established, including regions where particularly important facilities are located (nuclear power plants, state district power plants, hydroelectric power stations), the safety of man-made waste storage facilities (including ash- and slag dumps), the formation of anomalies of toxic elements in groundwater [5; 6; 11–15; **Ошибка! Источник ссылки не найден.**; 20; 22].

Radon in fault zones of crystalline rocks on the NPP site. Radon research was carried out in

especially drilled exploration wells, the layout of which is shown in Figure 1, one of which (4602) uncovered a zone of tectonic fault in the area of the 4th block at the NPP. This fault zone was previously (in 1992) assumed by the author of this article based on archival geological data, and later (in 2012) was finally confirmed by drilling and engineering geophysics methods (see Fig. 2). In addition to the new wells shown in Figure 3, subsequently, other preserved hydrogeological wells within the city of Enerhodar and the industrial zone of the Zaporizhzhia State District Power Plant were included in the testing, but the analysis of measurement data for all available wells in the 5 km zone is beyond the scope of this article. (Fig.1).



Fig. 1. The well location diagram on the Zaporizhzhia NPP site

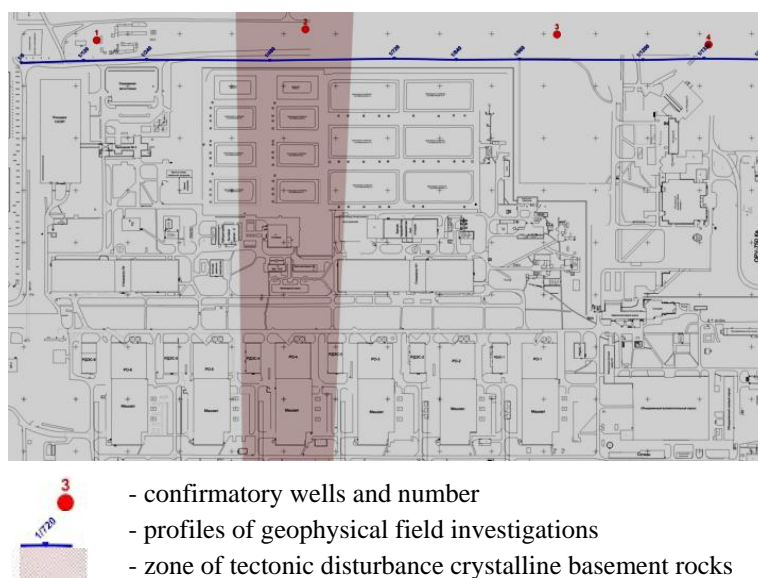


Fig. 2. The position of the tectonic fault zone on the Zaporizhzhia NPP site (in the diagram well 2 corresponds to the location of well no. 4602).



Fig. 2. Well 4602 in the tectonic fault zone of the Zaporizhzhia NPP site before retrofitting

Hydrogeological conditions of the NPP site. On the map of groundwater exploration in Ukraine, the described territory is confined to the junction zone of the fissure water area of the Ukrainian Crystalline Massif and the Black Sea artesian basin.

At the site of the Zaporizhzhia NPP during engineering and geological surveys in 1970–1996, three aquifers were discovered up to a depth of 90 m.

The most studied upper-ground aquifer is confined to the thickness of Quaternary aeolian-alluvial sands of layers 4, 4A, 5, 5A, and 5B. Occurrence depths of level are 4.0–4.6 (conventional elevation is 17.36–18.18 m). The thickness of the aquifer is 28.6–30.0 m. The lower aquiclude is tertiary clay of layer 9, lying at depths of 31.3–34.4 m (conventional elevation is minus 9.8–12.36 m). In the thickness of the sands, the separating layer of Quaternary loams of layer 7, up to 1.7 m thick, is not consistent in terms of area and forms “hydraulic windows.” This causes the division of the Quaternary aquifer into two subhorizons, differing in feed-discharge conditions and filtration properties. The first subhorizon from the surface, confined to fine sands with a filtration coefficient (F_c) of 5–8 meters/day, is free-flow. The feed of the subhorizon is mixed. It is carried out due to the infiltration of atmospheric precipitation, possible leaks from underground water-carrying communications and objects, inflow from hypsometrically higher located built-up (an industrial zone of the State District Power Plant), and unbuilt-up territories (Central Dome), condensation of vapors of the aeration zone. The aquifer is

discharged into the Kakhovka Reservoir, located 400–500 m to the east and southeast (the normal headwater elevation is 15.8–16.28 m according to level measurements in the Kakhovka Reservoir in the area of the pumping station of the Zaporizhzhia State District Power Plant in 1993), into the lower subhorizon, as well as into the drainage under the administrative and amenity building and spray cooling ponds. The second subhorizon is confined to the thickness of fine and average alluvial sands with $F_c = 20$ –25 meters/day in the lower part of the section, lying on the aquiclude – clays of the Sirohozy suite (formerly, the Kharkiv Stage) of the Upper Paleogene. In roofing, there is a sandy loam of layer 6 and a loam of layer 7. Feeding is inflow from the Central dome and cross-flow from the 1st subhorizon through “hydraulic windows”. Discharging is the cooling pond and aquiferous sand spit under the Kakhovka Reservoir. According to the chemical composition of the water, it belongs to the hydrocarbonate-sulfate-calcium-magnesium type with a dry residue of up to 1 gram/liter.

The second, pressurized aquifer is contained in clayey sands and sandstones of the Paleogene (layers 10, 11). The upper aquiclude is the clays of layer 9, the lower is the kaolins of layer 12. The pressure head is 37–38 m. The piezometric level coincides with the level of the ground aquifer. It is possibly fed by inflow from the overlying horizon. The horizon has a hydraulic link with the waters of the underlying horizon. The chemical composition of water is variable. Waters have increased alkalinity and mineralization.

The third one, possibly also pressurized, aquifer is confined to the fractured zone of granites of the crystalline basement (layer 14). The upper aquiclude is kaolins of layer 12. The water encroachment of rocks is uneven. Flow rates are small – up to 1 l/sec. The waters were previously assumed to be highly mineralized, but this was later refuted. In the available stock literature, it has been repeatedly noted that studying the characteristics of the feed-and-discharge of aquifers 2 and 3, as well as their chemical composition, at the industrial site of

the Zaporizhzhia NPP has not previously been carried out in detail.

Based on drilling data from 2012, groundwater of layer 14 at well site No. 4604 can be assessed as free-flow, well No. 4602 is low-pressure. The water inflow into the bore of well No. 4602, which uncovered the crushing zone of crystalline basement rocks, is no less than 0.027 m³/hour, and into well No. 3 (4604) is no more than 0.0068 m³/hour. Thus, the assumption about the pressure character of the aquifer in the crystalline basement rocks was not confirmed by drilling data.

Chemical analyses of water samples from wells No. 4602 and 4604 were performed in chemical laboratories at the State-owned Public Enterprise “YuzhUkrGeology” and LLC “Metal” of Dnipropetrovsk (Dnipro). According to the chemical composition, water from well No. 4602, selected on November 2, 2012, in crystalline basement rocks, belongs to sodium chloride-sulfate with a dry residue of 0.578 g/l and pH 7.91. After removing the 146 mm diameter external casing overlapping aquifers in alluvial sands, the type and composition of water in the well did not change. The waters sampled on November 6, 2012, also belong to sodium chloride-sulfate with a dry residue of 0.268 g/l and pH 8.0. The waters taken on November 6, 2012, from well No. 4604, which also uncovered crystalline basement rocks, stands apart. According to the chemical composition, waters from well No. 4604 refer to hydro carbonate-sulfate-sodium-magnesium with a dry residue of 0.2 g/l and pH 8.0. Differences in chemical composition confirm the identified differences in the geological structure and tectonic conditions on the sites of these wells. Previously made assumptions about the high mineralization of groundwater circulating in crystalline basement rocks were not confirmed in the course of studies of their chemical composition on the sites of these wells.

Sampling technique. Before sampling, the well had to be pre-pumped with a pump or bailer to remove no more than 2–3 volumes of water from the wellbore. If possible, sampling should be done after the water level in the well has been restored.

When using an airlift for pumping wells, sampling is carried out no earlier than 2–3 hours after its completion to avoid radon degassing and distortion of indicators. Airlift should be used only if it is not technically possible to change the water in the well in another way. If it is impossible to carry out pumping (very low water abundance and small water inflow in an area of difficult water exchange) or an established negative effect of airlift pumping on the indicators of volumetric radon activity, it is allowed for comparative purposes to take samples without preliminary pumping directly from the sampler after its lifting from the well.

The sample is taken without preliminary settling with or without a rubber tube. It was desirable to reduce the contact of the selected water sample with the atmosphere to a minimum. To collect water samples, we used 1 L hermetically sealed bottles made of dark borosilicate glass. Rinsing the vessels with the test water was not allowed, since the radon released during this process could partially remain in the vessel, which could distort the measurement results. It was necessary to draw water to the very top of the bottle, then immediately close the bottleneck with a screw cap with the lining. In the case of long-distance transportation, the bottleneck was additionally sealed hermetically with a rubber cap over the cork. Transportation was carried out upside down. The date and time of sampling was noted on the label. Water samples were delivered to their destination no later than 2 days after sampling, at low concentrations – no later than 1 day. To take water samples from small-diameter wells of the geodynamic polygon at the Zaporizhzhia NPP, a special small-sized sampler with a volume of 1.5 l and a diameter of 63 mm with a polypropylene body was designed and successfully used (see the photo in Fig. 4).



Fig. 4. The portable well sampler

Methods for determining radionuclides in water samples. Methods of the “Scientific and Technical Center KORO”, Zhovti Vody city

The content of radionuclides in water samples was defined by the gamma spectrometric method following the requirements of the “Methodology for performing measurements using an SGS-200 scintillation gamma energy spectrometer (based on LP 4900B)”.

The essence of the method is the adsorption of radon onto activated carbon by bubbling water samples, followed by its analysis on a gamma spectrometer by gamma radiation of the daughter products of radon decay, which are in equilibrium in the carbon adsorber.

Before carrying out the research, the spectrometer was operationally checked for the efficiency of detecting radiation from the adsorbent, and the calibration coefficient was clarified for the activity of a working standard of the solution with known volumetric activity of radon, followed by comparison with a standard radium source.

Determination of radium activity was carried out after measuring the concentration of radon in selected water samples with preliminary removal by bubbling of undecayed radon contained in the water, with their subsequent interval to at least 21 days before the start of measurements.

The measurements were carried out using a gamma spectrometric installation based on a scintillation detector in the SGS-200 protection and an amplitude analyser of the LP4900B type.

The methodology of the specialized nuclear physics laboratory, the Central Laboratory of the State-owned Public Enterprise “Kirovgeology” in Kyiv.

The content of radionuclides in water samples was determined with a portable radiometer under the provisions of departmental document 431 452.104.001:2009 MVI “Methods for performing measurements of radon-222 in samples of drinking water with the radiometer “RGA-03M” (“Alpha 1M”).” The RGA-03M radiometer (Alpha 1M) was used in the measurements.

Methodology certified by the laboratory LLC “Center for Radioecological Monitoring” (“CREM”), Zhovti Vody city, Dnipropetrovsk region.

The gamma spectrometric method carried out the determination of OA ^{222}Rn at this stage. The operating principle is based on obtaining a hardware spectrum of pulses from a gamma radiation detector that records the radiation of a counting sample exposed under fixed measurement conditions. A 0.5-liter water sample was placed in a Marinelli vessel. The measurements were done using the ORTEC gamma spectrometric complex (made in the USA) and the sample measurement time ranged from 27,000 to 57,000 s. The radionuclide activity in the test sample was determined by machine processing of the resulting spectrum using the “Maestro” software package.

Calculations of ^{222}Rn activity were carried out using total absorption peaks with energies of 352 and 609 keV, corresponding to the daughter products of the ^{222}Rn – Pb-214 – Bi-214 decay chain. Decay products are in equilibrium with radon ^{222}Rn because the time between sampling and its measurement exceeded 3 hours (The half-lives of Pb-214 and Bi-214 are 26.8 and 19.8 minutes, respectively). The technique ensures a total analysis error of no more than 30%.

In addition to these techniques, there are others described in the specialized literature [4; 12; 13; 16].

Research results. *Research results in 2012.* The purpose of the measurements is to determine the radionuclides ^{222}Rn and ^{226}Ra in selected water samples.

The works were carried out by the Laboratory of Chemical, Radiochemical, and Radiometric Analyses “Scientific and Technical Center KORO” in the Zhovti Vody city, Dnipropetrovsk region.

Sample measurements were carried out from November 2, 2012, to November 29, 2012, under normal conditions.

The results of the research and measurements of the volumetric (specific) activity of ^{222}Rn and ^{226}Ra in selected groundwater samples are presented in Table 1.

Table 1

Results of well testing during drilling

Sl. No.	Well No.	Sample No.	Sampling depth, m	Volumetric (specific) activity of water samples, Bq/l	
				²²² Rn	²²⁶ Ra
1	4602	1	70	17.2	< 0.5
2	4602	2	75	13.2	< 0.5
3	4602	3	80	15.8	< 0.5
4	4602	4	85	15.3	< 0.5
5	4604	1	73	4.3	< 0.5
6	4604	2	72	5.6	< 0.5
7	4604	3	72	4.5	< 0.5
8	4604	4	73	3.5	< 0.5
9	4604	5	71	4.6	< 0.5
10	4604	6	72	4.9	< 0.5
11	4604	11	73	6.8	< 0.5
12	4604	12	72	4.8	< 0.5
13	4604	13	71	6.6	< 0.5

Note: the content of ²²⁶Ra is below the minimum detectable activity (MDA) level, which is less than 0.5 Bq for each 1-liter water sample.

Based on the results of the analysis, it was decided to abandon the determination of ²²⁶Ra in groundwater during subsequent observation cycles.

Research results in 2014. Works of the 1st cycle were carried out by a specialized nuclear physics laboratory at the Central Laboratory of the *State-owned Public Enterprise "Kirovgeology"* in Kyiv, which passed the appropriate state certification.

To reduce the delivery time of samples to the place of analysis, works of cycles 2 and 3 were carried out by the certified laboratory of LLC "Center for Radioecological Monitoring" ("CREM") in the Zhovti Vody city, Dnipropetrovsk region.

During the research in 2014, methods for testing observation wells at the geodynamic polygon and laboratory research were developed and refined, and an equipment list with the required technical characteristics was determined.

The analysis of the performed results in 2012 and 2014 for mining (drilling), mineralogical, petrographic, hydrogeochemical, and radiochemical research confirmed the presence of a fault zone in hard rocks in the foundation of the Ukrainian crystalline massif (UKM), crossing the industrial site of the Zaporozhzhia NPP between blocks 4 and 5. The fault zone uncovered by well No. 4602

belongs to minor shallow faults of the lowest rank.

Significant differences in the chemical composition of groundwater samples taken from wells No. 4601, 4602, and 4604 during the observation period suggest that the low-pressure waters uncovered by well No. 4602 are of the fissure-vein type and have a sodium chloride composition, while those uncovered by wells No. 4601 4604 are free-flow fissure waters of a zone of difficult water exchange of sulfate-hydro carbonate-sodium, hydro carbonate-sulfate-sodium and sulfate-sodium composition. Throughout all monitoring cycles, the chemical composition of water in wells No. 4602 was relatively stable, while in other wells it was subject to significant fluctuations, partly of a technogenic nature (annular filtration). Noteworthy is the increased alkalinity of groundwater in all observed wells.

Differences in the chemical composition and radiological parameters of groundwater samples taken from wells No. 4601, 4602, and 4604 allow us to assert that a flooded crush zone of fault was uncovered by well No. 4602, and ordinary rocks of the weathering crust of crystalline rocks were uncovered by wells No. 4601 and 4604, respectively, downthrown and elevated blocks.

The absence of some kind of significant U-TR mineralization in crystalline rock cores from confirmatory wells contributed to the

absence of distortions in determining the volumetric activity of radon (VAR) in groundwater samples.

However, the VAR values in groundwater obtained during the 2014 research are significantly lower than those obtained in 2012 when testing wells immediately after the completion of drilling operations.

The VAR values determined by various instrument systems in water samples from confirmatory wells, that had been taken both after pumping before sampling and without them, generally differ slightly and are actually at the lower sensitivity limit of the laboratory equipment used (table 2). However, there is still some relationship between the operations preceding sampling from wells, such as the presence or absence of pumping, the depth of sampling, and the obtained RAR values, and this is most clearly manifested in wells No. 4602 and 4604.

Table 2

The pivot table for the volumetric activity of radon in groundwater of the geodynamic polygon at the ZaNPP throughout 1, 2, 3 monitoring cycles in 2014

Sl. No.	Well No.	Volumetric ^{222}Rn activity in Bq/l (Bq/dm ³) on the date of well testing		
		Sampling dates		
		28/05/2014	21/08/2014	14/10/2014
1	4601	0.3	0.380	0.333
2	4602	0.7	0.075	0.204
3	4604	0.7	0.164	0.314

The low VAR values recorded throughout 2014 were also, apparently, a consequence of the unsatisfactory condition of the wellbores, which had not been used for a long time. There is no doubt about the presence of damage to the casing columns (well No. 4604), annular filtration, and, as a consequence, the entry of groundwater into wells No. 4601, 4604 from the overlying alluvial aquifers. As well as the presence of significant silt deposits at the bottoms of all wells.

It is possible that the low VAR values obtained from wells No. 4601, 4602, 4604 were also a consequence of the use of various methods for pumping wells before testing during the 2014 research. In the 1st cycle, a low-power airlift with a shallow immersion

depth of the mixer was used. In the 2nd cycle, to obtain comparative values, there was without pumping, and in the 3rd cycle, an improved airlift with a greater immersion depth of the mixer was used. This was necessary to find the most optimal pumping method in the specific conditions of the geodynamic polygon of the Zaporizhzhia NPP. In general, as follows from the results of the research, the use of airlift in the conditions of the industrial site of Zaporozhzhia NPP is not optimal, especially for fissure-vein waters. In the future, preference should be given to pumping wells either with small-diameter submersible pumps or bottom-hole bailing. And with mandatory cleaning of the bottoms of wells from silt deposits before taking samples for radon. Inspection of wells and cleaning of their bottoms from silt deposits must be carried out constantly. It was also considered necessary to carry out a television survey (scanning) concerning the condition of the casing of well bores No. 4601, 4602, and 4604 using submersible small-sized equipment.

Research results in 2015. The works at all 4 stages were carried out by the certified laboratory of LLC "Center for Radioecological Monitoring" ("CREM") in the Zhovti Vody city, Dnipropetrovsk region.

The results of measurements of volumetric ^{222}Rn activity in selected groundwater samples are presented in Table 3.

Table 3

The pivot table for the volumetric activity of radon in groundwater of the geodynamic polygon at the ZaNPP throughout 1, 2, 3 and 4 monitoring cycles in 2015

Sl. No.	Well No.	Volumetric ^{222}Rn activity in Bq/l on the date of well testing			
		Sampling dates			
		08/04/2015	08/06/2015	17/08/2015	02/11/2015
1	4601	0.049	0.422	0.970	0.484
		0.050	0.424	0.969	0.485
2	4602	0.017	0.096	0.286	0.792
		0.018	0.097	0.285	
3	4604	0.050	0.659	0.716	1.330
		0.052	0.660	0.717	1.331

Pumping wells before taking water samples was carried out with an improved airlift with an increased immersion depth of the mixer.

However, the obtained values turned out to be significantly lower than those measured in 2014. Although throughout the year there was an increase in volumetric activity in all wells.

The results of testing the wells of this group unequivocally testify in favor of refusing in the future to pump these wells before sampling, as well as making significant adjustments to the research methodology. In general, it was confirmed that the use of airlift in the conditions of the industrial site of the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant is not optimal. In the future, preference should be given to pumping wells either with submersible or small-diameter vacuum pumps and bottom-hole bailing or to refuse to pump these wells altogether.

All applied methods of laboratory testing of water samples for radon generally showed high convergence of results and may be used well in the future. However, due to the low values, sample processing in the future should be carried out with portable field instruments directly at the research point. It does not exclude the option of permanently placing special sensors (radon stations) at the bottom of wells that record VAR without sampling.

Assessment of radon activity of the identified tectonic fault for the period 2012–2015. The contrast of emanation anomalies according to the methodology of the Institute of the Earth's Crust SB RAS [17] was assessed using the relative indicator:

$$K_Q = Q_{max} / Q_{min},$$

(where Q_{max} is the peak value of the parameter Q , a Q_{min} is the minimum value of the parameter Q in rocks beyond the boundary of the fault zone) and tends to certain levels of this parameter in a sample of dozens of studied disjunctive structures. This made it possible to identify five groups of fault zones based on radon activity: low ($K_Q \leq 2$), average ($2 < K_Q \leq 3$), increased ($3 < K_Q \leq 5$), high ($5 < K_Q \leq 10$), ultra-high ($K_Q > 10$).

The zones of influence of the faults of the last two groups pose a danger in terms of the construction and operation of buildings. This technique was developed based on soil radon, as it was found out in Prydniprovsk State

Academy of Civil Engineering and Architecture (PSACEA) is also quite valid for radon in groundwater, but needs significant improvement. On its basis, a new technique was subsequently developed, the main advantage of which was the presence of a one-of-a-kind universal numerical scale that takes into account both soil radon and radon in groundwater [17].

The VAR indicators obtained during the research generally agree well with the developed universal scale. It should be noted that more or less significant OAR indicators were achieved immediately after the completion of the drilling process, in which the destruction of rock due to vibration contributed to the release of a certain amount of radon from the crystal grid of minerals. Subsequently, due to the wellbores silting with stagnant water, annular filtration, as well as the difficult-to-predict features of well pumping technology (effective for groundwater and turned out to be ineffective for fractured waters of a zone of difficult water exchange), the VAR values decreased to their natural values. Nevertheless, the goals and objectives of the research were fully achieved.

Analysis of the sampling results made it possible to assert (based on the existing classification), that there are no traces of any tectonic activity of a natural character in the territory of the geodynamic polygon immediately adjacent to the site of the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant, and primarily in the fault zone uncovered by well No. 4602 and crossing the industrial site of the NPP in the area of the 4th block.

The results of assessing the activity of the fault zone are given in Table 4.

Originality and Practical value. The result of conducting comparative research on the volumetric activity of radon in the aquifer of fissure-vein waters and the Quaternary ground aquifer during 2012–2015 confirmed the fundamental possibility for monitoring the tectonic activity of fault zones of the geodynamic polygon at the Zaporizhzhia NPP. This is also possible based on sampling only the upper (ground) aquifer, even considering its

openness and exposure to various technogenic factors.

Table 4

The pivot Table for assessing the activity of the tectonic fault at the site is based on the determination of the VAR in groundwater

Research period	No. of wells	Q_{max} is average (in the fault zone) Bq/l	Q_{min} is average (on the wings) Bq/l	$K_Q = Q_{max} / Q_{min}$	The degree of radon activity of fault zones
2012	4602–4604	15.38	5.7	2.69	Average
2014	4601–4602–4604				
	1 cycle	0.7	0.3	2.33	average
	2 cycle	0.075	0.164	0.46	low or absent
	3 cycle	0.204	0.314	0.65	low or absent
2015	4601–4602–4604				
	1 cycle	0.018	0.050	0.36	low or absent
	2 cycle	0.097	0.541	0.18	low or absent
	3 cycle	0.286	0.845	0.34	low or absent
	4 cycle	0.792	0.907	0.87	low or absent

It should be noted that these highly specialized studies were carried out at the Zaporizhzhia NPP site for the first time. The authors of this work do not have information about conducting similar research at the sites of other atomic power plants in the country and beyond. With the improvement of the methodology, it is possible to use it both at the sites of other atomic power plants, especially those located in seismically active zones, and other high-risk facilities [16; 18; 21; 23–33].

Conclusion

The result of implementing the comparative research on indicators of volumetric activity of radon in the waters of the aquifer of fissure-vein waters and the Quaternary ground aquifer during 2012–2015 confirmed the fundamental possibility for monitoring the tectonic activity of fault zones of the geodynamic polygon at the Zaporizhzhia NPP. This is also possible based on sampling only the upper (ground) aquifer. Even considering its openness and exposure to various man-made factors. This is especially important, moreover since the overwhelming number of existing wells in the area where the Zaporizhzhia NPP is located are equipped specifically for the ground quaternary aquifer.

It was found that pumping wells on the groundwater aquifer before sampling, including airlift, have a significant impact on the VAR indicators, increasing the intensity of radon emission. At the same time, similar pumping of

wells No. 4601, 4602, and 4604, equipped on the crystalline foundation, sharply reduces the intensity of radon emission and for the same reason, sampling procedures should be changed in the future. For this reason, in the future, it will be advisable to carry out control sampling for radon from wells No. 4601, 4602, and 4604 only with special bottom (zonal or sector) sampling systems. With the further use of these wells to obtain better quality indicators, they are subject to mandatory technical inspection and cleaning of the bottom hole from silt deposits, using specially manufactured small-sized equipment.

In the future, the option of permanently placing special sensors at the bottom of wells that record VAR without sampling is not excluded, if the use of such is justified. It is also possible to additionally install sensors for recording soil radon in the wells of base seismic stations located near the NPP site. Or they are located near the researched wells of a geodynamic polygon.

All applied methods of laboratory testing of water samples for radon generally showed high convergence and can be used in the future. However, due to low VAR values, sample processing should be carried out with portable field instruments directly at the research point.

In general, the results obtained during the study of the hydro-geo-deformational field and monitoring of radon in groundwater indicate the absence of neo-tectonic activity of a natural character in the area of the geodynamic polygon directly adjacent to the site of the

Zaporizhzhia NPP, and primarily in the zone of the sub-latitudinal fault uncovered by well No. 4602 and crossing the nuclear power plant site in the area of the 4th block.

In line with the results of research in 2015, indirect radio-hydro-geochemical signs of some activity on individual sections of the tectonic structures of the crystalline basement were identified at adjacent sites, both within the 5 km zone of the Zaporizhzhia NPP location and near the boundaries of the zone, probably having the nature of creeping displacements, partly by

confirmed and high-precision geodetic observations. Certain sections of the North-Kamenskyi fault, including in the area of the urban water intake, may be the most likely of the presumably neo-tectonically active structures within the research area. Exactly they are of greatest interest for further research. Based on research results from 2012–2015, a promising comprehensive research program was even developed. But after the well-known events of February 2022, the question of resuming research is very, very problematic.

REFERENCES

1. Alokhin V.I., Tobyash V.E., Koinash P.V. and Prystynska M.V. *Neotektonichna aktyvnist ta pronyknist trishchynnykh struktur hranitnoho masyu Kamiani Mohyly* [Neotectonic activity and permeability of fissure structures of the Kamiani Mohyla granite massif]. *Naukovi pratsi DonNTUU. Seriiia : hirnycho-heolohichna* [Scientific Works of DonNTUU. Series : Mining and Geological]. 2002, no. 45, pp. 107–112. (in Ukrainian).
2. *Atlas. Heolopia i korysni kopalyny Ukrainy* [Atlas. Geology and Minerals of Ukraine]. Kyiv : YHN NAN Ukrainy, 2001, 168 p. (in Ukrainian).
3. Alokhin V.I., Korchemahyn V.B. and Koinash P.V. *Osoblyvosti heokhimii gruntovykh vidkladen na diliantsi peretynu Pivnichno-Volnovaskoho ta Viktorivskoho rozlomiv* [Peculiarities of the geochemistry of soil sediments at the intersection of the North Volnovasky and Viktorivsky faults]. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriiia : hirnycho-heolohichna* [Scientific Works of DonNTU. Series : Mining and Geological]. 2003, no. 55, pp. 120–125. (in Ukrainian).
4. Avseienko V.F. *Dozymetrychni ta radiometrychni prylady ta vymiruvannia* [Dosimetric and radiometric devices and measurements]. Kyiv : Urozhai Publ., 1990, 144 p. (in Ukrainian).
5. Voievoda B.Y., Sobolev E.H. and Savchenko. O.V. *Heodynamika ta yii rol u stalomu rozvytku rehioniv* [Geodynamics and its role in the sustainable development of regions]. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriiia : hirnycho-heolohichna* [Scientific Works of DonNTU. Series : Mining and Geological]. 2002, no. 45, pp. 88–93. (in Ukrainian).
6. Horbushyna L.V. and Riaboshtan Yu.S. *Imanatsiinyi metod indykatsii heodynamichnykh protsesiv pry inzhenerno-heolohichnykh doslidzhenniakh* [The emanation method of indicating geodynamic processes in engineering and geological research]. *Radianska heolohiia* [Soviet Geology]. 1975, no. 4, pp. 106–112. (in Ukrainian).
7. Hudzenko V.V., Holykov T.O., Hudzenko H.Y. and Shevchenko O.L. *Radon u pidzemnykh vodakh Kyyeva* [Radon in underground waters of Kyiv]. *Visnyk Kyyivs'koho natsional'noho universytetu im. T. Shevchenka. Heolohiia* [Bulletin of the Kyiv National University named by T. Shevchenko. Geology]. 2004, no. 29–30, pp. 101–104. (in Ukrainian).
8. Alohyn B.I., Boiko B.C., Boreiko V.O., Borodavko O.B. and oth. *Donbas zapovidnyi : naukovoinformatsiinyi dovidnyk-atlas* [Donbas is protected : scientific and informational guide-atlas]. Donetsk : Donetsk branch of the State Institute of Advanced Training and Retraining of Personnel of the Ministry of Energy and Resources of Ukraine, 2003, 160 p. (in Ukrainian).
9. Deriabin H.N. *Radiatsiia ta liudyna* [Radiation and man]. Mariupol : ZAO “Pryazovskiy robochyi”, 2001, 256 p. (in Ukrainian).
10. *Klasyfikatsiia mineralnykh vod Ukrainy* [Classification of mineral waters of Ukraine]. Under the editorship Acad. NAS of Ukraine V.M. Shestopalova. Kyiv, 2003. (in Ukrainian).
11. Kostenetskyi M.Y., Hrybynenko H.T., Kravtsova L.S., Antonova H.L. and Khrypko Z.A. *Radioekologicheskiye issledovaniya podzemnykh istochnikov pit'yevogo vodosnabzheniya Zaporozhskoy oblasti i dozy oblucheniya naseleniya* [Radioecological studies of underground sources of drinking water supply in Zaporizhzhia region and population radiation doses]. *Ekologiya i zdorov'ye cheloveka* [Ecology and human health]. Kharkiv, 2003, pp. 859–861. (in Ukrainian).
12. Laryonov V.V. and Rezmanov R.A. *Yadernaia heofyzyka y radyometrycheskaia razvedka* [Nuclear Geophysics and Radiometric Prospecting]. 1988. (in Russian).
13. Maksymov M.T. and Odzhahov H.O. *Radyoaktyvnye zahriaznennia y ykh izmerenye* [Radioactive Contamination and Its Measurement]. 1989, 304 p. (in Ukrainian).
14. *Normy radiatsiinoi bezpeky Ukrainy NRB-97/D-2000 (DHN 6.6.1.–6.5.061-2000) Derzhavni hihienichni normatyvy. Ministerstvo okhorony zdorov'ia (MOZ)* [Radiation safety standards of Ukraine NRB-97/D-2000 (DGN 6.6.1.–6.5.061-2000). National hygienic standards, Ministry of Health (MoH)]. 2000. (in Ukrainian).

15. Panov B.S, Riaboshtan Yu.S, Takhtamyrov E.P. and Alokhin V.I. *Pro novyi metod strukturno-heodynamichnykh doslidzhen* [About the new method of structural-geodynamic investigations]. *Radianska heolohiia* [Soviet Geology]. 1984, no. 1, pp. 66–75. (in Ukrainian).
16. *DSanPiN 2.2.4-171-10. Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoi dlia spozhyvannia liudynoiu Yssledovanye vody: radyonuklydy* [DSanPiN 2.2.4-171-10. Hygienic precautions for drinking water intended for human consumption. Water research : radionuclides]. (in Ukrainian).
17. Siedin V.L., Bausk Ye.A., Ulianov V.Yu. and Bikus K.M. *Shkala otsiniuvannia aktyvnosti tektonichnykh rozlomiv zemnoi kory za intensyvniuiu radonovydilennia – zastosuvannia dlia ob'ektiv AES* [The scale for assessing the activity of tectonic faults in the earth's crust based on the intensity of radon production is a standard for AES objects]. *Osnovi i fundamenti : mizhvidom. nauk-tekh. zb. Kyiv. nats. un-t bud-va i arkh. [Basics and foundations : between species Science and Technology coll. of the Kyiv. National University of Civil Engineering and Architecture]*. Kyiv, 2015, no. 37, pp. 52–63. (in Ukrainian).
18. Sedin V.L. and Ulianov V.Yu. *Do pytannia pro tektoniku ploshchadky AES "Akkuiu" v Turetskii Respublitsi* [Read more about the tectonics of the Akkuyu Nuclear Power Plant site in the Turkish Republic]. *Svit heotekhniky* [World of Geotechnics]. No. 4 (63), 2019, pp. 27–33. (in Ukrainian).
19. Tokarev A.N. and Shcherbakov A.V. *Radyohydroheolohiia* [Radiohydrogeology]. 1956, 264 p. (in Russian).
20. Tokarev A.N., Kutsel E.N. and Popova T.P. *Radiohydroheolohichniyi metod poshukiv rodovyshch uranu* [Radiohydrogeological method of searching for uranium origins]. 1975, 225 p. (in Russian).
21. Ulianov V.Yu. *Zastosuvannia radonometrii dlia vyivlennia zon tektonichnykh rozlomiv pid chas prokhodzhenia tuneliv metropoliteni v m. Dnipro* [Use of radon measurements to identify zones of tectonic faults during the passage of metro tunnels in the Dnipro city]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transport* [Science and Progress in Transport. Newsletter of the Dnipropetrovsk National University of Transport]. 2021, no. 5 (95), pp. 103–117. (in Ukrainian).
22. Shashkyn V.L. *Metody analiza estestvennykh radyoaktyvnykh yzotopov* [Methods of analysis of natural radioactive isotopes]. 1972. (in Russian).
23. Wilkening M. *Radon in the environmental studies in environmental Science* 40. Amsterdam : Elsevier, 1990.
24. Valeria Lupiano, Salvatore Procopio, Gabriele Buttafuoco, Valeria Rago and Giulio Iovine. *Indoor radon measurements in Calabria (Southern Italy)*. *Journal of Maps*. 2022.
25. Xuan P.T., Duong N.A., Van Chinh V., Dang P.T., Qua N.X. and Van Pho N. *Soil Gas Radon Measurement for Identifying Active Faults in Thua Thien Hue (Vietnam)*. *Journal of Geoscience and Environment*. 2020.
26. Chunyu He, Zhi Zeng, Lei Zhang, Yunxiang Wang and Qiuiu Guo. *A new-designed system for continuous measurement of radon in water*. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 187, September 2022.
27. Mehrabi A., Pirasteh S., Rashidi A., Pourkhosravani M., Derakhshani R., Liu G., Mao W. and Xiang W. *Incorporating Persistent Scatterer Interferometry and Radon Anomaly to Understand the Anar Fault Mechanism and Observing New Evidence of Intensified Activity*. *Remote Sens*. 2021, vol. 13, iss. 2072, 22 p.
28. González-Díez A., Soto J., Gómez-Arozamena J., Bonachea J., Martínez-Díaz J.J., Cuesta J.A., Olague I., Remondo J., Fernández Maroto G. and Díaz de Terán J.R. *Identification of latent faults using a radon test*. *Geomorphology*. Vol. 110, iss. 1–2, September 2009, pp. 11–19.
29. Sun X., Yang P., Xiang Y. et al. *Across-fault distributions of radon concentrations in soil gas for different tectonic environments*. *Geosciences Journal*. 2018, vol. 22, pp. 227–239.
30. Yao Yang, Ying Li, Zhijun Guan, Zhi Chen, Lei Zhang, Chao Jia Lv and Fengxia Sun. *Correlations between the radon concentrations in soil gas and the activity of the Anninghe and the Zemuhe faults in Sichuan, southwestern of China*. *Applied Geochemistry*. Vol. 89, February 2018, pp. 23–33.
31. Wang X., Li Y., Du J. and Zhou X. *Correlations between Radon in Soil Gas and the Activity of Seismogenic Faults in the Tangshan Area, North China*. *Radiation Measurements*. 2014, vol. 60, pp. 8–14.
32. Benà E., Ciotoli G., Ruggiero L. et al. *Evaluation of tectonically enhanced radon in fault zones by quantification of the radon activity index*. *Sci Rep*. 2022, vol. 12, p. 21586.
33. Michalakis Omirou, Alexandros Clouvas and Fokion Leontaris. *Metrology aspects (sampling, storage, transportation, and measurement) of radon in water*. *Journal of the European Radon Association*. 2022, no. 3:8643, pp. 1–16.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Альохін В. І., Тобиаш В. Є., Койнаш П. В., Пристинська М. В. Неотектонічна активність та проникність тріщинних структур гранітного масиву Кам'яні Могили. *Наукові праці ДонНТУУ. Серія: гірничо-геологічна*. 2002. Вип. 45. С. 107–112.
2. Атлас. Геологія і корисні копалини України. Київ : ИГН НАН України, 2001. 168 с.
3. Альохін В. І., Корчемагин В. Б., Койнаш П. В. Особливості геохімії ґрунтових відкладень на ділянці перетину Північно-Волноваського та Вікторівського розломів. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: гірничо-геологічна*. 2003. Вип. 55. С. 120–125.
4. Авсеєнко В. Ф. Дозиметричні та радіометричні прилади та вимірювання. Київ : Урожай, 1990. 144 с.

5. Воевода Б. И., Соболев Е. Г., Савченко О. В. Геодинаміка та її роль у сталому розвитку регіонів. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: гірничо-геологічна*. 2002. Вип. 45. С. 88–93.
6. Горбушина Л. В., Рябоштан Ю. С. Іманаційний метод індикації геодинамічних процесів при інженерно-геологічних дослідженнях. *Радянська геологія*. 1975. № 4. С. 106–112.
7. Гудзенко В. В., Голиков Т. О., Гудзенко Г. Й., Шевченко О. Л. Радон у підземних водах Києва. *Вісник Київського національного університету ім. Т. Шевченка. Геологія*. 2004. Вип. 29–30. С. 101–104.
8. Альохин В. І., Бойко В. С., Борейко В. О., Бородавко О. Б. та ін. Донбас заповідний : науково-інформаційний довідник-атлас. Донецька філія Державного інституту підвищення кваліфікації та переподготовки кадрів Мінекоресурсів України. Донецьк, 2003. 160 с.
9. Дерябін Г. Н. Радіація та людина. Маріуполь : ЗАО «Приазовський робочий», 2001. 256 с.
10. Класифікація мінеральних вод України. Під ред. акад. НАН України В. М. Шестопалова. Київ, 2003.
11. Костенецький М. И., Грибиненко Г. Т., Кравцова Л. С., Антонова Г. Л., Хрипко З. А. Радиоекологические исследования подземных источников питьевого водоснабжения Запорожской области и дозы облучения населения. *Экология и здоровье человека*. 2003. С. 859–861.
12. Ларионов В. В. Резванов Р. А. Ядерная геофизика и радиометрическая разведка. 1988.
13. Максимов М. Т., Оджагов Г. О. Радиоактивные загрязнения и их измерение. 1989. 304 с.
14. Норми радіаційної безпеки України НРБУ-97/Д-2000 (ДГН 6.6.1.-6.5.061-2000). Державні гігієнічні нормативи. Київ : Міністерство охорони здоров'я (МОЗ), 2000.
15. Панов Б. С, Рябоштан Ю. С, Тахтамиров Е. П., Альохін В. І. Про новий метод структурно-геодинамічних досліджень. *Радянська геологія*. 1984. № 1. С. 66–75.
16. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. Дослідження води : радіонукліди.
17. Седін В. Л., Бауск Є. А., Ульянов В. Ю., Бікус К. М. Шкала оцінювання активності тектонічних розломів земної кори за інтенсивністю радоновиділення – застосування для об'єктів АЕС. *Основи і фундаменти: міжвідом. наук-техн. зб. Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт.* Київ, 2015. Вип. 37. С. 52–63.
18. Седін В. Л., Ульянов В. Ю. До питання про тектоніку площадки АЕС «Аккую» в Турецькій Республіці. *Світ геотехніки*. № 4 (63). 2019. С. 27–33.
19. Токарев А.Н., Щербаков А. В. Радиогидрогеология. 1956. 264 с.
20. Токарев А. Н., Куцель Е. Н., Попова Т. П. Радиогидрогеологический метод поиска залежей урана. 1975. 225 с.
21. Ульянов В. Ю. Застосування радонометрії для виявлення зон тектонічних розломів під час проходження тунелів метрополітену в м. Дніпро. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2021. № 5 (95). С.103–117.
22. Шашкин В. Л. Методы анализа естественных радиоактивных изотопов. 1972.
23. Wilkening M. Radon in the environmental studies in environmental Science 40. Amsterdam : Elsevier, 1990.
24. Valeria Lupiano, Salvatore Procopio, Gabriele Buttafuoco, Valeria Rago, Giulio Iovine. Indoor radon measurements in Calabria (Southern Italy). *Journal of Maps*. 2002.
25. Xuan P. T., Duong N. A., Van Chinh V., Dang P. T., Qua N. X., Van Pho N. Soil Gas Radon Measurement for Identifying Active Faults in Thua Thien Hue (Vietnam). *Journal of Geoscience and Environment*. 2020.
26. Chunyu He, Zhi Zeng, Lei Zhang, Yunxiang Wang, Qiuiu Guo. A new-designed system for continuous measurement of radon in water. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 187. September 2022.
27. Mehrabi A., Pirasteh S., Rashidi A., Pourkhosravani M., Derakhshani R., Liu G., Mao W. and Xiang W. Incorporating Persistent Scatterer Interferometry and Radon Anomaly to Understand the Anar Fault Mechanism and Observing New Evidence of Intensified Activity. *Remote Sens*. 2021. Vol. 13, iss. 2072. 22 p.
28. González-Diez A., Soto J., Gómez-Arozamena J., Bonachea J., Martínez-Día de Terán Identification of latent faults using a radon test. *Geomorphology*. Vol. 110, iss. 1–2. September 2009. Pp. 11–19.
29. Sun X., Yang P., Xiang Y. et al. Across-fault distributions of radon concentrations in soil gas for different tectonic environments. *Geosciences Journal*. 2018. Vol. 22. Pp. 227–239.
30. Yao Yang, Ying Li, Zhijun Guan , Zhi Chen, Lei Zhang , Chao Jia Lv. Fengxia Sun Correlations between the radon concentrations in soil gas and the activity of the Anninghe and the Zemuhe faults in Sichuan, southwestern of China. *Applied Geochemistry*. Vol. 89. February 2018. Pp. 23–33.
31. Wang X., Li Y., Du J. & Zhou X. Correlations between Radon in Soil Gas and the Activity of Seismogenic Faults in the Tangshan Area, North China. *Radiation Measurements*. 2014. № 60. Pp. 8–14.
32. Benà E., Ciotoli G., Ruggiero L. et al. Evaluation of tectonically enhanced radon in fault zones by quantification of the radon activity index. *Sci Rep*. 2022. Vol. 12. P. 21586.
33. Michalakakis Omirou, Alexandros Clouvas, Fokion Leontaris. Metrology aspects (sampling, storage, transportation, and measurement) of radon in water. *Journal of the European Radon Association*. 2022. № 3:8643. Pp. 1–16.

Надійшла до редакції: 13.11.2024.

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 ННІ «ПДАБА»,
Український університет науки і технологій

А д р е с а р е д а к ц і ї:
✉ вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Україна, м. Дніпро
кімната 501 (відповідальний секретар)
☎ +38 (050) 452-43-63
e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com

Підписано до друку 06.03.2025 р. Формат 60×84 1/8.
Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 8,88. Умовн. фарб.-відб. арк. 8,88.
Обл.-видавн. арк. 17,75. Наклад 50 прим. Зам. 213

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 ESI “PSACEA”,
Ukrainian University of Science and Technologies

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 March 2025. Format 60×84 1/8.
Digital printing. Conventional quire 8,88. Conventional colour imprints 8,88.
Publisher's signatures 17,75. Number of copies 50. Order 213