

ISSN 2618-0650 (Print)
ISSN 2664-1364 (Online)

Механіка



та математичні методи

**Mechanics
and Mathematical Methods**

**Науковий журнал
The scientific journal**

VII/1/2025

УДК 531 : 51-7 (05)
М55

МЕХАНІКА ТА МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ

Науковий журнал



Засновник і видавець:

Одеська державна академія будівництва та архітектури

**Том VII
№1
2025**

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації: Серія КВ №23478–13318 Р від 13.07.2018 р.

Рішення Національної ради №1162 від 26.10.2023 р.,
протокол №24; ідентифікатор медіа: R30-01810

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
Серія ДК №4515 від 01.04.2013 р.

М55 **Механіка та математичні методи** : науковий журнал. — Одеса : ОДАБА, 2025. —
Том VII. — №1. — 172 с.

В науковому журналі публікуються статті і огляди за спеціальностями:

- 111 Математика;
- 112 Статистика;
- 113 Прикладна математика;
- 121 Інженерія програмного забезпечення;
- 122 Комп'ютерні науки та інформаційні технології;
- 124 Системний аналіз;
- 131 Прикладна механіка;
- 192 Будівництво та цивільна інженерія.

Рекомендовано до друку Вченою радою Одеської державної академії будівництва та архітектури, протокол №9 від 20.03.2025 р.

Адреса: редакція журналу «Механіка та математичні методи»
Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, Україна, 65029

Телефони: (048)7234937, (048)7323402, (048)7298563

E-mail: mmm@odaba.edu.ua

Web: mmm-journal.com.ua

УДК 531 : 51-7 (05)
М55

ISSN 2618-0650 (Print)
ISSN 2664-1364 (Online)

Одеська державна академія
будівництва та архітектури, 2025

Редакційна колегія:

Головний редактор: Ковров А. В., к.т.н., проф., ректор Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;

Заступники головного редактора:

Крутий Ю. С., д.т.н., проф., професор кафедри інформаційних технологій та прикладної математики Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;

Сур'янінов М. Г., д.т.н., проф., завідувач кафедри будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;

Відповідальний секретар: Кіосак В. А., д.ф.-м.н., проф., професор кафедри вищої математики Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;

- Бербюк В. Є., д.ф.-м.н., проф., професор кафедри механіки та морських наук, Технічний університет Чалмерса, Гетеборг, Швеція;
- Ватуля Г. Л., д.т.н., проф., професор кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту, Харків, Україна;
- Горик О. В., д.т.н., проф., професор кафедри будівництва та професійної освіти Полтавської державної аграрної академії, Полтава, Україна;
- Куріазопоулос А., к.т.н., доц., професор кафедри будівництва, Університет Західної Аттики, Афіни, Греція;
- Кода Е., д.т.н., проф., декан факультету будівництва та інженерії середовища Варшавського природничого університету, Варшава, Польща;
- Кононов Ю. М., д.ф.-м.н., проф., завідувач відділу теорії керуючих систем інституту прикладної математики та механіки НАН України, Слав'янск, Україна;
- Круглов В. Є., д.ф.-м.н., проф., професор кафедри методів математичної фізики Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна;
- Кучер М. К., д.т.н., проф., завідувач відділу конструкційних матеріалів інституту проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна;
- Лазарева Д. В., к.т.н., доцент кафедри динаміки машин та механічної інженерії національного університету «Одеська політехніка», Одеса, Україна;
- Лесечко О. В., к.ф.-м.н., доц., завідувач кафедри вищої математики Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;
- Лещенко Д. Д., д.ф.-м.н., проф., завідувач кафедри теоретичної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;
- Ляшенко Т. В., д.т.н., проф., професорка кафедри процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів Одеської державної академії будівництва та архітектури, Одеса, Україна;
- Максимович О. В., д.т.н., проф., професорка кафедри зварювального виробництва, діагностики та відновлення металоконструкцій Національного університету "Львівська політехніка", Львів, Україна;
- Мікуліч О. А., д.т.н., проф., завідувачка кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету, Луцьк, Україна;
- Отрош Ю. А., д.т.н., проф., начальник кафедри пожежної профілактики в населених пунктах Національного університету цивільного захисту України, Харків, Україна;
- Пастернак Я. М., д.ф.-м.н., проф., професор кафедри комп'ютерних наук та кібербезпеки Волинського національного університету імені Лесі Українки, Луцьк, Україна;
- Пневматікос Н., к.т.н., доц., доцент кафедри будівництва, Університет Західної Аттики, Афіни, Греція;
- Савченко О. Г., д.ф.-м.н., проф., професор кафедри алгебри, геометрії та математичного аналізу Херсонського державного університету, Херсон, Україна;
- Трач В. М., д.т.н., проф., завідувач кафедри мостів і тунелів, опору матеріалів і будівельної механіки Національного університету водного господарства та природокористування, Рівне, Україна.

Видавничий редактор: Теорло Наталя Анатоліївна, аспірантка

Технічний редактор: Гедулян Сергій Іванович, к.т.н., доцент кафедри процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів

Лінгвістичний радник з англійської мови: Мар'яно Яніна Георгіївна, к.ф.н, доц., завідувачка кафедри іноземних мов

The composition of the editorial board:

Chief Editor: A. Kovrov, Ph.D., Professor, Rector of Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine;

Deputy Chief Editor:

Yu. Krutii, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Information Technologies and Applied Mathematics of Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine;

Suryaninov M., Doctor of Technical Science, Professor, Head of Structural Mechanics Department, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, Ukraine;

Assistant Editor: V. Kiosak, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of Higher Mathematics Department, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine;

- V. Berbyuk, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor in Mechanical Systems, Division of Dynamics, Department of Mechanics and Maritime Sciences Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden;
- G. Vatulia, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Structural Mechanics and Hydraulics Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine;
- O. Goryk, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Construction and Professional Education, Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine;
- A. Kyriazopoulos, Ph.D., Professor Department of Civil Engineering University of West Attica, Athens, Greece;
- E. Koda, Doctor of Technical Science, Professor, Dean of Construction and Environmental Engineering Faculty, University of Life Sciences, Warsaw, Poland;
- Y. Kononov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Control-system Theory Division, Institute of Applied Mathematics and Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine, Slavyansk, Ukraine;
- V. Kruglov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of Chair of Methods of Mathematical Physics Odessa I. I. Mechnikov National University, Odesa, Ukraine;
- M. Kucher, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Structural Materials Division, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine;
- D. Lazareva, Ph.D., Associate Professor of the Department of Machine Dynamics and Mechanical Engineering of the Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine;
- O. Lesechko, Ph.D., Associate Professor, Head of Higher Mathematics Department, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine;
- D. Leshchenko, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Theoretical Mechanics Department, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine;
- T. Lyashenko, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Processes and Devices in Construction Materials Technology, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine;
- O. Maksymovych, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of Department of Welding Engineering, Diagnostics and Rebuilding of Metal Structures, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine;
- O. Mikulich, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department of Engineering Mechanics Department, Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine;
- Y. Otrosh, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department of Civil Protection Service, National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine;
- Y. Pasternak, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of the of Computer Science and Cyber Security, Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine;
- N. Pnevmatikos, Ph.D., Associate Professor Department of Civil Engineering University of West Attica, Athens, Greece;
- O. Savchenko, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of Algebra, Geometry and Mathematical Analysis Department, Kherson State University, Kherson, Ukraine;
- V. Trach, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department of Bridges and Tunnels, Strength of Materials and Structural Mechanics, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine.

Publishing Editor: Natalia Teorlo, Postgraduate Student

Technical Editor: Serhii Hedulian, Ph.D., Associate Professor of the Department of Processes and Apparatuses in Building Materials Technology

Linguistic Adviser in English language: Yanina Marianko, Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Foreign Languages

ЗМІСТ

Лещенко Д. Д., Козаченко Т. О. Збурені рухи твердого тіла з рухомою масою під дією постійного моменту.....	6
Yu. Krutii, V. Osadchiy, V. Surianinov Calculation of a culver pipe by the numerical-analytical boundary elements method.....	15
Щолоков Е. Е., Майборода Р. І., Рашкевич Н. В., Отрош Ю. А., Балдук П. Г. Дослідження ефективності системи оповіщення та евакуації дітей з порушення слуху у закладах освіти.....	26
Барабаш І. В., Горбовий О. Л. Механоактивація портландцементу з добавкою меленого вапняку і її вплив на міцність будівельного розчину.....	48
V. Fomin, I. Fomina Analysis of the sustainability of a spatial building.....	58
Беспалова А. В., Хотін С. Ю., Коновалов С. М. Інформаційна система для очищення води на судах морського та річкового флоту...	66
Кіосак В. А., Патрашку Є. В. Моделювання впливу вентиляції на концентрацію радону в приміщенні.....	78
О. Pysarenko Non-Fourier heat conduction in two-dimensional media.....	90
Клименко О. В., Сухомлинова О. В., Кравченко В. В. Методи обробки великих даних і прогнозування тимчасових рядів за допомогою нейронних мереж.....	103
Сорока М. М. Граничне навантаження арок із врахуванням згинального моменту і повздовжньої сили.....	115
Лисенко М. С. Розробка алгоритму пошуку оптимального маршруту у закритих приміщеннях	125
Заїка Н. П. Дослідження теплових властивостей гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок в умовах пожежі.....	138
Даник Ю. О., Кіріченко Д. О. Застосування систем штучного інтелекту для вирішення проблем пожежної безпеки.	152

CONTENT

D. Leshchenko, T. Kozachenko Perturbed motions of a rigid body with a movable mass under the action of constant torque.....	6
Yu. Krutii, V. Osadchiy, V. Surianinov Calculation of a culver pipe by the numerical-analytical boundary elements method	15
E. Shcholokov, R. Maiboroda, N. Rashkevich, Yu. Otrosh, P. Balduk Research effectiveness of the modern system of notification and evacuation of children with hearing impairments in educational institutions.....	26
I. Barabash, O. Gorboviy Mechanical activation of portland cement with the addition of ground limestone and its effect on the place of bind solution.....	48
V. Fomin, I. Fomina Analysis of the sustainability of a spatial building	58
A. Bespalova, S. Khotin, S. Konovalov Information system for water purification on marine and river fleet vessels	66
V. Kiosak, Ye. Patrashku Modelling the effect of ventilation on indoor radon concentration.....	78
O. Pysarenko Non-Fourier heat conduction in two-dimensional media	90
O. Klymenko, O. Sukhomlynova, V. Kravchenko Methods of processing big data and forecasting time series using neural networks.....	103
M. Soroka Limit load of arches taking into account bending moment and longitudinal force	115
M. Lysenko Development of an algorithm for searching for the optimal route in indoor premises.....	125
N. Zaika Research on the thermal properties of gypsum plasterboard cladding of steel beams under fire conditions.....	138
Yu. Danyk, D. Kirichenko Application of artificial intelligence systems to solving fire safety problems.....	152

УДК 531.381

ЗБУРЕНІ РУХИ ТВЕРДОГО ТІЛА З РУХОМОЮ МАСОЮ ПІД ДІЄЮ ПОСТІЙНОГО МОМЕНТУ

Лещенко Д. Д.¹, Козаченко Т. О.¹

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація: Проблема руху твердого тіла відносно нерухомої точки є однією з класичних задач механіки. Зацікавленість науковцями задачами динаміки твердого тіла посилилась в другій половині ХХ сторіччя в зв'язку з розвитком ракетно-космічної техніки. Дослідження руху супутників навколо центра мас важливо для створення систем управління орієнтацією, стабілізації руху і для розв'язування практичних задач космонавтики. В статті за допомогою метода усереднення одержується наближене розв'язання задачі про рух динамічно симетричного твердого тіла з в'язкопружним елементом під дією постійного моменту в зв'язаних осях. При визначенні фактичної орієнтації штучного супутника Землі була відмічена мала зміна модуля вектору кінетичного моменту супутника на ділянці польоту з вимкненою системою орієнтації. Ця зміна була пояснена присутністю малого моменту збурення, який є постійним в зв'язаній з супутником системі координат. У випадку малих моментів сил можна застосовувати методи збурень для визначення аналітичних або чисельних описів руху. Асимптотичний підхід дозволяє одержати деякі якісні результати і описувати еволюцію руху твердого тіла за допомогою спрощених усереднених рівнянь та чисельного розв'язку. В роботі проведена процедура усереднення та одержані усереднені рівняння, які простіше початкових, та описують рух на великому інтервалі часу. Одержані кількісні та якісні результати досліджень руху під дією постійного моменту динамічно симетричного твердого тіла з рухомою масою та був представлений опис еволюції руху тіла. Проведено чисельне інтегрування усередненої системи рівнянь руху твердого тіла. Графічні зображення розв'язків представлені та обговорені. Одержано систему рівнянь руху в стандартній формі. Досліджено еволюцію руху Ейлера-Пуансо під дією малих внутрішніх та зовнішніх моментів. Стаття може розглядатися як розвиток попередніх задач про рух твердого тіла під дією малих моментів (порожнини, яка заповнена рідиною великої в'язкості, рухомої маси, постійних моментів в зв'язаних з тілом осях). Робота вносить вклад в вивчення задач руху космічних кораблів і рухів членів екіпажів відносно цих тіл. Одержані результати важливі для управління з допомогою рухомих мас, для рухів оберткових снарядів.

Ключові слова: динамічно симетричне тверде тіло, рухома маса, пружні та дисипативні елементи, постійний момент.

PERTURBED MOTIONS OF A RIGID BODY WITH A MOVABLE MASS UNDER THE ACTION OF CONSTANT TORQUE

D. Leshchenko¹, T. Kozachenko¹

¹Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract: The problem of a rigid body motion about a fixed point is one of the classical problems of mechanics. The interest in the problem of the rigid body dynamics has increased in the second half of the XX century in connection with the development of rocket and space technologies. The study of the motion of a satellite about center of mass is important for creating systems of orientation control, stabilization of motion and for solving the practical problems of astronautics. The paper develops an approximate solution by means of an averaging method for the motion in dynamically symmetric rigid body containing a viscoelastic element and subjected to constant body-fixed torque. Reference was made to the angular momentum vector of a satellite, noted during the determination of the actual orientation of the artificial earth satellite. This change was explained as a



result of the presence of a small perturbation torque, which is constant in a fixed axes relative to the satellite. In the case of small torques, it is possible to use perturbation methods to obtain analytical and numerical descriptions of motion. The numerical integration of the averaged system of equations is conducted for the body motion. The graphical presentations of the solutions are represented and discussed. We received the system of motion equations in standard form. The asymptotic approach permits to obtain some qualitative results and to describe evolution of rigid body motion using simplified averaged equations and numerical solution. The paper can be considered as mainstreaming of previous works for the problem of rigid body motion under the action of small torques (cavity filled with a fluid of high viscosity, moving mass, constant body-fixed torques). The advantage of this work is in receiving the original asymptotic and numerical calculations, as well as solutions that describe the evolution of rigid body motion with a moving mass and subjected to constant body-fixed torque. The paper presents a contribution in the problems of spacecraft motion, and the activities of crew members about the vehicles. The importance of the results is in the moving mass control, and the motions of spinning projectiles.

Keywords: dynamically symmetric rigid body, movable mass, elastic and dissipative elements, constant torque.

1 ВСТУП

На рух супутника відносно центра мас діють моменти сил різної фізичної природи. Це, наприклад, моменти, які обумовлені рухом мас всередині тіла. Ці рухи можуть бути спричинені наявністю в тілі роторів, гіроскопів, а також змінами положень екіпажу.

Вивчення впливу випускання газу в системі стабілізації супутника на його рух відносно центра мас зводиться до задачі про еволюцію обертання твердого тіла під дією моменту, постійного в зв'язаних осях.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Аналіз літературних джерел показує, що вивчення руху динамічно симетричного тіла з рухомою масою є складною, але важливою задачею. Вона потребує застосування теорії диференціальних рівнянь і чисельного моделювання для дослідження поведінки системи. Рухомі маси всередині тіла впливають на динамічну поведінку системи. Огляд робіт з цієї тематики представлений в [1-4].

Космічний апарат або супутник, перебуваючи на орбіті навколо свого центра мас, знаходиться під впливом моментів сил різної фізичної природи. Сюди входять моменти, що генеруються рухом внутрішніх мас. Значна кількість робіт присвячена аналізу різноманітних проблем динаміки космічних апаратів, що містять внутрішні рухомі маси. В [4-18] вивчалися питання стійкості і нестійкості, резонансних явищ, стабілізації рухів. У роботі [11] оцінено вплив на стійкість рівномірного руху гіроскопа Лагранжа рухомих точкових мас (лінійних осциляторів), що здійснюють коливання вздовж осі симетрії гіроскопа або вздовж осей, ортогональних до осі симетрії.

У роботі [12] тверде тіло з деякими рухомими частинами розглядається як можлива модель космічного апарата з масою, що ексцентрично обертається, також вивчено динаміку положення і керування за допомогою внутрішніх обертових мас.

У роботах [8, 13, 14] досліджено задачу про оптимальну за швидкодією стабілізацію вільного твердого тіла з рухомою масою. Розглянуто задачу про сповільнення обертання в середовищі з опором динамічно симетричного твердого тіла, що містить в'язкопружний елемент, за мінімальний час.

В [15, 16] досліджена задача квазіоптимального за швидкодією керування обертань динамічно симетричного тіла з в'язкопружним елементом в середовищі з опором. Розглянута задача квазіоптимального за швидкодією гальмування обертань динамічно симетричного твердого тіла з порожниною, заповненою в'язкою рідиною, та з в'язкопружним елементом в середовищі з опором.

У статті [17] побудовано наближений розв'язок за допомогою методу усереднення системи рівнянь Ейлера з додатковими членами збурення для майже динамічно сферичного жорсткого тіла, що містить в'язкопружний елемент. Отриманно розв'язки, які описують еволюцію руху твердого тіла з рухомою масою на нескінченному інтервалі часу з асимптотично малою похибкою.

В [18] досліджено задачу про рух в середовищі з опором динамічно симетричного твердого тіла з рухомою масою, яка з'єднана з тілом пружною в'язкою за наявності в'язкого тертя. Результати, які представлені в цій роботі дають можливість аналізувати кутові рухи штучних супутників під дією малих збурюючих моментів.

В роботах [19-23] були знайдені аналітичні розв'язки задачі про рух симетричного твердого тіла, близького до динамічно симетричного під дією моменту, який є постійним в зв'язаних з тілом осях. В [23] досліджується рух відносно центра мас близького до динамічно сферичного твердого тіла з в'язкою рідиною під дією



постійного моменту. В [24] досліджується рух симетричного гіростата, заповненого рідиною великої в'язкості, під дією постійного моменту.

Розглянемо рух динамічно симетричного тіла з рухомою масою, яка прикріплена в'язкопружним демпфером до точки на осі симетрії (в недеформованому стані) [1], під дією постійного моменту. Наближена система рівнянь збуреного руху в проєкціях на головні центральні осі інерції має вигляд [1]

$$\begin{aligned} A\dot{p} + (C - A)qr &= Lqr + Spr^4 + \varepsilon M_1, \\ A\dot{q} + (A - C)pr &= -Lpr + Sqr^4 + \varepsilon M_2, \\ C\dot{r} &= -AC^{-1}Sr^3(p^2 + q^2) + \varepsilon M_3, \end{aligned} \quad (1)$$

де p, q, r – проєкції абсолютної кутової швидкості $\bar{\omega}$ на головні центральні осі інерції, $\mathbf{J} = \text{diag}(A, A, C)$ – тензор інерції незбуреного тіла, M_i ($i = 1, 2, 3$) – проєкції постійного моменту в зв'язаних з тілом осях, $0 < \varepsilon \ll 1$ малий параметр.

Коефіцієнти L, S характеризують збурюючі моменти сил, які обумовлені наявністю в'язкопружного елемента, та виражаються через параметри системи наступним чином:

$$\begin{aligned} L &= m\rho^2 \Omega^{-2} A^{-3} C (A^2 p^2 + A^2 q^2 + C^2 r^2), \\ S &= m\rho^2 \lambda \Omega^{-4} C^3 (A - C) A^{-4}, \end{aligned} \quad (2)$$

де m – маса рухомої точки, ρ – відстань від центра мас недеформованої системи до точки кріплення, яка знаходиться, за припущенням, на осі динамічної симетрії цього тіла. Сталі $\Omega^2 = c/m$, $\lambda = \delta/m$ визначають частоту коливань і швидкість їх згасання відповідно; c – жорсткість (коефіцієнт пружності), δ – коефіцієнт в'язкості демпфера.

3 ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для застосування асимптотичного метода до розв'язку системи (1) зробимо деякі припущення, щодо коефіцієнтів Ω, λ [1]

$$\Omega^2 \gg \lambda \omega \gg \omega^2. \quad (3)$$

Нерівності (3) дозволяють знехтувати ділянками вільних коливань рухів маси, які обумовлені початковими відхиленнями, внаслідок їх швидкого згасання і врахувати вимушені квазістаціонарні рухи, викликані обертанням тіла.

Згідно до умови (3) $\Omega^{-2}, \lambda \Omega^{-4}$ є малими параметрами, такими що $\Omega^{-2} \sim \varepsilon, \lambda \Omega^{-4} \sim \varepsilon$.

Якщо припустити, що $\varepsilon = 0, \Omega^{-2} = 0, \lambda \Omega^{-4} = 0$, то система (1) інтегрується.

В цьому випадку, при $r_0 \neq 0$, змінні p, q здійснюють гармонічні коливання, частота яких $|(C - A)r_0|$ залежить від r_0 . Відповідно система рівнянь (1) є нелінійною.

Розв'язок системи (1) при цих припущеннях має вигляд

$$p = a \cos \varphi, \quad q = a \sin \varphi, \quad r = r_0. \quad (4)$$

Застосуємо (4) як перетворення до змінних a, r , де $a^2 = p^2 + q^2, a > 0, \varphi = r(C - A)A^{-1}t$. Диференціюючи та роблячи ряд перетворень маємо, що $\dot{a} = \dot{p} \cos \varphi + \dot{q} \sin \varphi$. Підставимо в цей вираз \dot{p} і \dot{q} з перших двох рівнянь (1)

та проведемо усереднення одержаного рівняння для a за фазою φ [25]. Тоді отримане рівняння для a і r мають вигляд (крапка – похідна за часом t):

$$\begin{aligned} \dot{a} &= SA^{-1}r^4a, \\ \dot{r} &= -AC^{-2}Sr^3a^2 + \varepsilon C^{-1}M_3. \end{aligned} \quad (5)$$

Після ряду перетворень та заміни змінних $x = a^2$, $y = r^2 > 0$, $r = \sqrt{y}$ приведемо (5) до наступної системи:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= 2A^{-1}Sxy^2, \\ \dot{y} &= -2C^{-2}SAxy^2 + 2\varepsilon C^{-1}M_3\sqrt{y}. \end{aligned} \quad (6)$$

В цій системі x , y – повільні змінні.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В математичному пакеті Maple, з застосуванням метода Рунге-Кутти-Фельберга п'ятого порядку точності, знайдено чисельний розв'язок системи (6) за початкових умов $x(0)=1$, $y(0)=1$ та при певних значеннях параметрів $\rho=1$; $m=1$; $\varepsilon=0.1$; $A=1.5$; $C=1$; та $M_3=-0.135$ або $M_3=-0.25$, а також значеннях λ та Ω , що зазначені в таблиці 1.

Таблиця 1

Значення параметрів λ та Ω

Випадок	λ	Ω
1	98	10
2	9	3

На рис. 1-2 зображено графіки зміни величин $x = a^2$ і $y = r^2$ квадратів екваторіальної та осьової компонент кутової швидкості твердого тіла при вказаних параметрах.

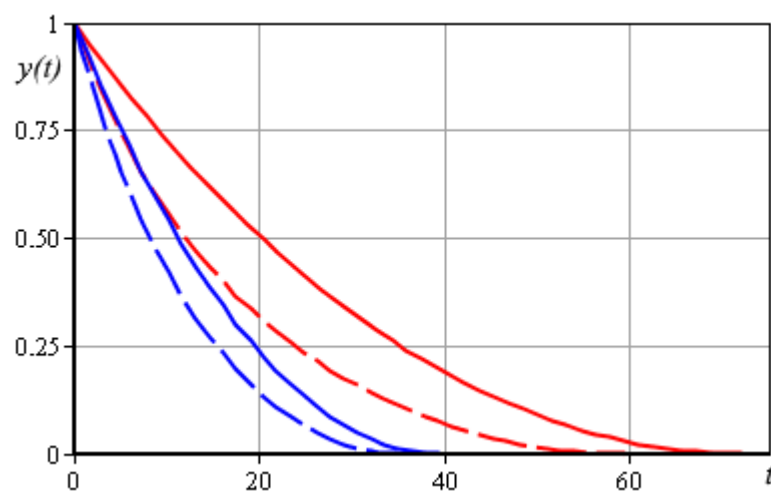


Рис. 1. Графіки змінної y в випадках 1 (—) та 2 (---) при значеннях момента $M_3 = -0.135$ (—) та $M_3 = -0.25$ (—)

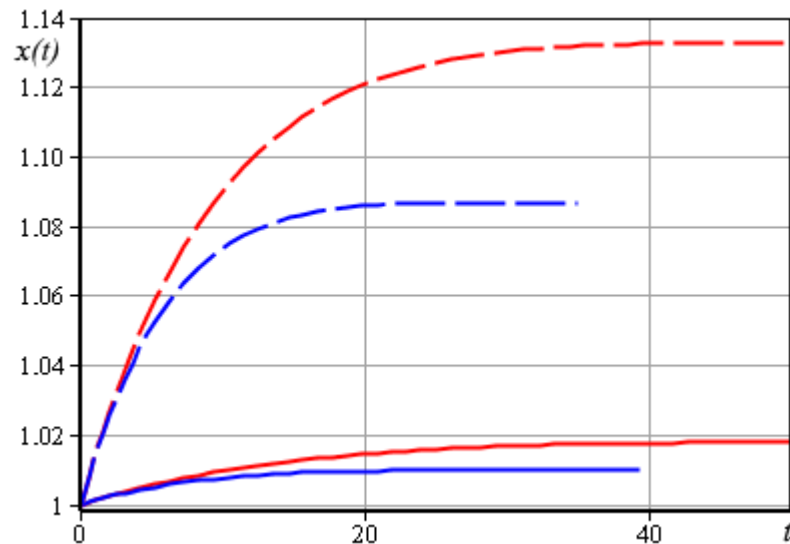


Рис. 2. Графіки змінної x у випадках 1 (—) та 2 (---) при значеннях моменту $M_3 = -0.135$ (—) та $M_3 = -0.25$ (---)

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Згідно до рис. 1 осьова компонента кутової швидкості $y = r^2$ спадає асимптотично наближаючись до нуля. Характер спадання залежить від величини постійного моменту M_3 , а також від величин Ω та λ , що характеризують частоту та час затухання вільних коливань. При $M_3 = -0.135$ прагнення y до нуля відбувається повільніше ніж при $M_3 = -0.25$. При значеннях Ω та λ у першому випадку час, за який спадає $y = r^2$ збільшується в порівнянні з випадком 2. Тобто збільшення величини постійного моменту M_3 та при співвідношенні $\lambda/\Omega^2 \sim 1$ проміжок часу, за який осьова компонента кутової швидкості прагне до нуля, зменшується.

Як бачимо з рис. 2 екваторіальна складова кутової швидкості $x = a^2$ зростає. Зростання x відбувається повільно та через деякий проміжок часу зовсім відсутнє, тобто x прагне до граничних значень: $x \rightarrow 1.01; 1.02; 1.09; 1.13$. На характер змінної $x = a^2$ має вплив співвідношення величин λ/Ω^2 . При $\lambda/\Omega^2 < 1$ зростання екваторіальної складової достатньо мале.

6 ВИСНОВКИ

В роботі представлено нові якісні та кількісні результати дослідження руху динамічно симетричного твердого тіла з рухомою масою, з'єднаною з тілом пружною в'яззю під дією постійного моменту. Одержано систему рівнянь у стандартній формі. До нелінійної системи рівнянь руху застосовано метод усереднення. Отриману систему було проаналізовано та знайдено чисельний розв'язок при певних параметрах. Одержані результати дали змогу оцінити динамічні ефекти, спричинені наявністю рухомої маси та постійним моментом. Нові результати розглядаються як узагальнення результатів, отриманих в попередніх роботах авторів. Важливість отриманих результатів зумовлена їх можливим застосуванням при аналізі руху штучних супутників, космічних кораблів, при керуванні рухомими масами, в гіроскопії.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори статті не має відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

Література

1. F. L., Akulenko L. D., Leshchenko D. D. Evolution of Motions of a Rigid Body About its Center of Mass. Springer, Cham, 2017.
2. Li T., Gao C., Li C., Ting W. A survey of moving mass control theory. Aerospace Science and Technology. Chernousko 2018. 82-83. P. 594-606.
3. Ogunwa T., Abdullah F., Chahl T. Modeling and Control of an Articulated Multibody Aircraft. Applied Sciences. 2022. 12. 1162.
4. Акуленко Л. Д., Лещенко Д. Д., Рачинская А. Л., Зинкевич Я. С. Возмущенные и управляемые вращения твердого тела. Одесса: ОНУ им. И.И. Мечникова, 2013. 287с.
5. Lurie A. I. Analytical Mechanics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 2002.
6. Month L. A., Rand R. H. Stability of a rigid body with an oscillating particle. An application of MACSYMA. Trans. ASME. Journal of Applied Mechanics. 1985. 52. P. 686-692.
7. Christov O. On the non-integrability of a system describing the motion of a rigid body with a fixed point and particle oscillating in it. Bulletin des Sciences Mathematiques. 1994. 118. P. 385-401.
8. Akulenko L. D., Leshchenko D. D. Some problems of the motion of a solid with a moving mass. Mechanics of Solids. 1978. 13 (5). P. 24-28.
9. Leshchenko D. D., Sallam S. N. Some problems on the motion of a rigid body with internal degrees of freedom. International Applied Mechanics. 1992. 28 (8). P. 524-528.
10. Akulenko L., Leshchenko D., Kushpil T., Timoshenko I. Problems of evolution of rotations of a rigid body under the action of perturbing moments. Multibody System Dynamics. 2001. 6 (1). P. 3-16.
11. Kononov Yu. N. Spin stability of a Lagrange top containing linear oscillators. Journal of Mathematical Sciences. 2001. 103 (1). P. 38-42.
12. Yanzu Liu, Li-Qun Chen. Chaos in attitude dynamics of spacecraft. Spinger; 2012.
13. Akulenko L. D., Leshchenko D. D. Optimal braking of the rotations of a solid body with internal degrees of freedom. Journal of Computer and Systems Sciences International. 1996. 34 (3). P. 127-135.
14. Akulenko L. D., Zinkevich Ya. S., Leshchenko D. D., Rachinskaya A. L. Optimal rotation deceleration of a dynamically symmetric body with movable mass in a resistant medium. Journal of Computer and Systems Sciences International. 2011. 50 (2). P. 198-204.
15. Akulenko L. D., Leshchenko D. D., Shchetinina Yu. S. Quasi-optimal deceleration of rotations of a rigid body with a moving mass in a resistive medium. Journal of Computer and Systems Sciences International. 2017. 56 (2). P. 186-191.
16. Akulenko L. D., Kozachenko T. A., Leshchenko D. D. Time quasi-optimal deceleration of rotations of a gyrostat with moving mass in a resistive medium. Journal of Computer and Systems Sciences International. 2019. № 58 (5). P. 667-673.
17. Leshchenko D., Ershkov S., Kozachenko T. Evolution of rotational motions of a nearly dynamically spherical rigid body with a moving mass. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation 2024, June 2024, 133, 107916. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2024.107916>
18. Лещенко Д. Д., Козаченко Т. О. Збурені рухи твердого тіла з рухомою масою в середовищі з опором. Механіка та математичні методи, 2023. Т. 5. № 2. С. 16-24. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2023-5-2-16-24>
19. Romano M. Exact analytic solution for a rotation of a rigid body having spherical ellipsoid of inertia and subjected to a constant torque. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. 2008. 100. P. 181-189.
20. Van der Ha J.C. Perturbation solution of attitude motion under body-fixed torques. Acta Astronautica. 1985. 12(10). P. 861-869.
21. Kane T.R., Levinson D.A. Approximate description of attitude motion of a torque-free, nearly axisymmetric rigid body. Journal of the Astronautical Sciences. 1987. 35(4). P. 435-446.

22. Ayobi M. A., Longuski J. M. Analytical solution for translational motion of spinning-up rigid bodies subject to constant body-fixed forces and moments. *Trans. ASME. Journal of Applied Mechanics*. 2008. 75(1). 011004/1-011004/8.
23. Leshchenko D., Ershkov S., Kozachenko T. Perturbed rotational motions of a nearly dynamically spherical rigid body with cavity containing a viscous fluid subject to constant body fixed torques, *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2023. V. 148. 104284
24. Лещенко Д. Д., Козаченко Т. О. Еволюція руху динамічно симетричного гіростата під дією постійного моменту. *Механіка та математичні методи*, 2023. Т. V. № 1. С. 25–32
25. Митропольский Ю. А. Метод усреднения в нелинейной механике. К.: Наукова Думка, 1971. 440с.

References

1. Chernousko F. L., Akulenko L. D., Leshchenko D. D. (2017). *Evolution of Motions of a Rigid Body About its Center of Mass*. Springer, Cham.
2. Li T., Gao C., Li C., Ting W. (2018). A survey of moving mass control theory. *Aerospace Science and Technology*. 82-83. 594-606.
3. Ogunwa T., Abdullah F., Chahl T. (2022). Modeling and Control of an Articulated Multibody Aircraft. *Applied Sciences*. 12. 1162.
4. Akulenko L. D., Leshchenko D. D., Rachinskaya A. L., Zinkevich Ya. S. (2013). *Vozmushchennyye i upravlyаемyye vrascheniya tverdogo tela* [Perturbed and controlled rotations of a rigid body]. Odessa: OHU im. I.I. Mechnikova. [in Ukrainian].
5. Lurie A. I. (2002). *Analytical Mechanics*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
6. Month L. A., Rand R. H. (1985). Stability of a rigid body with an oscillating particle. An application of MACSYMA. *Trans. ASME. Journal of Applied Mechanics*. 52. 686–692.
7. Christov O. (1994). On the non-integrability of a system describing the motion of a rigid body with a fixed point and particle oscillating in it. *Bulletin des Sciences Mathematiques*. 118. 385–401.
8. Akulenko L. D., Leshchenko D. D. (1978). Some problems of the motion of a solid with a moving mass. *Mechanics of Solids*. 13 (5). 24–28.
9. Leshchenko D. D., Sallam S. N. (1992). Some problems on the motion of a rigid body with internal degrees of freedom. *International Applied Mechanics*. 28 (8). 524–528.
10. Akulenko L., Leshchenko D., Kushpil T., Timoshenko I. (2001). Problems of evolution of rotations of a rigid body under the action of perturbing moments. *Multibody System Dynamics*. 6 (1). 3–16.
11. Kononov Yu. N. (2001). Spin stability of a Lagrange top containing linear oscillators. *Journal of Mathematical Sciences*. 103 (1). 38–42.
12. Yanzu Liu, Li-Qun Chen. (2012). *Chaos in attitude dynamics of spacecraft*. Spinger.
13. Akulenko L. D., Leshchenko D. D. (1996). Optimal braking of the rotations of a solid body with internal degrees of freedom. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 34 (3). 127–135.
14. Akulenko L. D., Zinkevich Ya. S., Leshchenko D. D., Rachinskaya A. L. (2011). Optimal rotation deceleration of a dynamically symmetric body with movable mass in a resistant medium. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 50 (2). 198–204.
15. Akulenko L. D., Leshchenko D. D., Shchetinina Yu. S. (2017). Quasi-optimal deceleration of rotations of a rigid body with a moving mass in a resistive medium. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 56 (2). 186–191.
16. Akulenko L. D., Kozachenko T. A., Leshchenko D. D. (2019). Time quasi-optimal deceleration of rotations of a gyostat with moving mass in a resistive medium. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 58 (5). 667–673.
17. Leshchenko D., Ershkov S., Kozachenko T. (2024). Evolution of rotational motions of a nearly dynamically spherical rigid body with a moving mass. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 133, 107916.
18. Leshchenko D., Kozachenko T. (2023). Perturbed motions of a rigid body with a movable mass in a resistive medium. *Mechanics and Mathematical methods*. 5 (2). 16–24. [in Ukrainian].
19. Romano, M. (2008). Exact analytic solution for a rotation of a rigid body having spherical ellipsoid of inertia and subjected to a constant torque. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 100. 181–189.

20. Van der Ha, J.C. (1985). Perturbation solution of attitude motion under body-fixed torques. *Acta Astronautica*. 12(10). 861–869.
21. Kane, T.R., Levinson, D.A. (1987). Approximate description of attitude motion of a torque-free, nearly axisymmetric rigid body. *Journal of the Astronautical Sciences*. 35 (4). 435–446.
22. Ayobi, M.A., Longuski, J.M. (2008). Analytical solution for translational motion of spinning-up rigid bodies subject to constant body-fixed forces and moments. *Trans. ASME. Journal of Applied Mechanics*. 75(1). 011004/1-011004/8.
23. Leshchenko D., Ershkov S., Kozachenko T. (2023). Perturbed rotational motions of a nearly dynamically spherical rigid body with cavity containing a viscous fluid subject to constant body fixed torques. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 148. 104284.
24. Leshchenko D., Kozachenko T. (2023). Evolution of dynamically symmetric gyrostat motion under the action of constant torque. *Mechanics and Mathematical Methods*. 5 (1). 25–32. [in Ukrainian].
25. Mitropolskiy Yu. A. (1971). *Metod usredneniya v nelineynoy mehanike* [Averaging method in nonlinear mechanics]. Kyiv, Naukova Dumka. [in Ukrainian].

Лешенко Дмитро Давидович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
д.ф.-м.н., професор
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
leshchenko_d@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-2436-221X

Козаченко Тетяна Олександрівна

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
к.ф.-м.н., доцент
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
kushpil.t.a@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9034-3776

Для посилань:

Лешенко Д. Д., Козаченко Т. О. Збурені рухи твердого тіла з рухомою масою під дією постійного моменту. *Механіка та математичні методи*, 2025. Т. 7. № 1. С. 6–14.

For references:

D. Leshchenko, T. Kozachenko. (2024). Perturbed motions of a rigid body with a movable mass under the action of constant torque. *Mechanics and Mathematical Methods*. 7 (1). 6–14.

UDC 624.04

CALCULATION OF A CULVER PIPE BY THE NUMERICAL-ANALYTICAL BOUNDARY ELEMENTS METHOD

Yu. Krutii¹, V. Osadchii¹, V. Surianinov¹

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

Abstract: The methodology for applying the numerical-analytical boundary elements method to the calculation of reinforced concrete and fiber-reinforced concrete culverts is considered. The force state of the pipe as part of the road embankment from the action of the soil mass and moving vehicle load is determined by an alternating diagram of bending moments with a maximum positive moment in the ridge and trough sections and a maximum negative moment in the side sections, which necessitates the need for double rod reinforcement. Such reinforcement has low efficiency. It is difficult to ensure the design thickness of the protective layer of concrete, the displacement of the ring reinforcement in the direction of reducing the protective layer reduces the operational reliability of the structure in terms of durability, and with an increase in the thickness of the protective layer, the bearing capacity of the section decreases. One of the effective solutions to this problem is the use of dispersed steel fiber reinforcement, which allows you to avoid the use of double rod reinforcement. In addition, steel-fiber concrete improves the characteristics of concrete, and also allows you to change the nature of the destruction process. Unlike conventional concrete, in which this process occurs almost instantly, brittle destruction does not occur in fiber concrete, and the structure continues to resist the load, and the nature of the destruction changes from brittle to ductile. Literature analysis shows that in Ukraine, the emphasis in the study of culverts is on corrugated and plastic pipes, and very little attention is paid to reinforced concrete and fiber concrete pipes. In the work, the culvert is considered as a circular cylindrical shell. As a result of the implementation of the algorithm in SCILAB, the values of deflections, angles of rotation, bending moments, transverse forces and stresses were calculated. In order to verify the obtained results, computer modeling of the pipe and finite element analysis of its stress-strain state in the ANSYS program were performed. A comparison of the stressed and displaced values obtained by the two methods shows that the maximum difference between the values of the stressed values is 0.65%, and the displaced values are 0.51%, which indicates the effectiveness of the proposed calculation method.

Keywords: culvert, fiber-reinforced concrete, cylindrical shell, boundary element method, SCILAB, ANSYS.

РОЗРАХУНОК ВОДОПРОПУСКНОЇ ТРУБИ ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Крутії Ю. С.¹, Осадчий В. С.¹, Сур'янінов В. М.¹

¹*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

Анотація: Розглядається методика застосування чисельно-аналітичного методу граничних елементів до розрахунку залізобетонних та фіробетонних водопропускних труб. Силовий стан труби у складі насипу дороги від дії маси ґрунту і рухомого автомобільного навантаження визначається знакозмінною епюрою згинальних моментів з максимальним позитивним моментом в коньковому і лотковому перерізах і максимальним негативним моментом в бічних перерізах, що обумовлює необхідність подвійного стрижневого армування. Таке армування має низьку ефективність. Важко забезпечити проектну товщину захисного шару бетону, зміщення кільцевої арматури в бік зменшення захисного шару знижує експлуатаційну надійність конструкції по довговічності, а із збільшенням товщини захисного шару знижується несуча здатність перерізу. Одним з ефективних рішень цієї проблеми є застосування дисперсного армування сталевую фіброю, яке дозволяє уникнути використання подвійного стрижневого



армування. Крім того, сталеві фібробетон покращує характеристики бетону, а також дозволяє змінити характер процесу руйнування. На відміну від звичайного бетону, в якому цей процес відбувається практично моментально, у фібробетоні не відбувається крихкого руйнування, і конструкція продовжує чинити опір навантаженню, а характер руйнування змінюється з крихкого на в'язкий. Аналіз літератури показує, що в Україні акцент у дослідженнях водопропускних труб робиться на гофрованих і пластмасових трубах, а залізобетонним і фібробетонним трубам приділяється дуже мало уваги. В роботі водопропускна труба розглядається, як кругова циліндрична оболонка. В результаті реалізації алгоритму у SCILAB обчислені значення прогинів, кутів повороту, згинальних моментів, поперечних сил і напружень. З метою верифікації одержаних результатів виконано комп'ютерне моделювання труби та скінченно-елементний аналіз її напружено-деформованого стану у програмі ANSYS. Порівняння напружень і переміщень, отриманих двома методами, показує, що максимальна розбіжність величин напружень становить 0,65%, а переміщень — 0,51%, що свідчить про ефективність запропонованого методу розрахунку.

Ключові слова: водопропускна труба, фібробетон, циліндрична оболонка, метод граничних елементів, SCILAB, ANSYS.

1 INTRODUCTION

Among many structures of circular cross-section, reinforced concrete culverts occupy a significant place. The force state of the pipe as part of the road embankment from the action of the soil mass and moving vehicle load is determined by an alternating diagram of bending moments with a maximum positive moment in the ridge and trough sections and a maximum negative moment in the side sections, which necessitates the need for double rod reinforcement.

The low efficiency of such reinforcement is due to the fact that in this case the relative working height of the section is small due to the need to ensure the requirements for the thickness of the protective layer of concrete for the working reinforcement. In this case, it is difficult to ensure the design thickness of the protective layer of concrete, the displacement of the circular reinforcement in the direction of reducing the protective layer reduces the operational reliability of the structure in terms of durability, and with an increase in the thickness of the protective layer, the bearing capacity of the section decreases. One of the effective solutions to this problem is the use of dispersed steel fiber reinforcement, which allows you to avoid the use of double rod reinforcement. In addition, steel fiber concrete allows you to improve such characteristics of concrete as crack resistance, frost resistance, tensile strength, bending, torsion, etc., and also allows you to change the nature of the destruction process. Unlike conventional concrete, in which this process occurs almost instantly, brittle destruction does not occur in fiber concrete, and the structure continues to resist the load, and the nature of the destruction changes from brittle to ductile.

2 ANALYSIS OF LITERATURE DATA AND RESOLVING THE PROBLEM

Literature analysis shows that in Ukraine, the emphasis in the study of culverts is on corrugated and plastic pipes, and very little attention is paid to reinforced concrete and fiber concrete pipes. We note the works [1-3]. The monograph [4] is very informative and useful in terms of the study of fiber concrete pipes. In work [1], the stress-strain state of fiber concrete water and sewer pipes manufactured by the dry vibropressing method was considered. Laboratory tests of fiber concrete samples for compression, bending, crack resistance, tension and heating were carried out at the test site. The optimal amount of fiber in concrete and the necessary calculated mechanical characteristics of fiber concrete were determined. The authors of the article [2] provide interesting statistics: as of the beginning of 2019, there were about 130 thousand pieces of culverts on public roads in Ukraine, more than 80% of which are reinforced concrete pipes.

It is known that the low tensile strength and brittleness of concrete [5-7] reduce its structural efficiency. These disadvantages can be significantly compensated by dispersed reinforcement of concrete [8, 9]. The resulting fiber-reinforced concrete is advantageously different from traditional concrete, having several times higher tensile and shear strength, impact strength, crack resistance, abrasion, frost resistance, water resistance, cavitation resistance, fatigue strength, heat resistance, fire resistance, fracture toughness. Studies have shown that the most indicative characteristics of fiber-reinforced concrete are strength, toughness and fracture work in axial tension and bending. According to the latter indicator, fiber-reinforced concrete can exceed standard concrete by 15-20 times [7-9].

From the point of view of structural mechanics, a culvert, regardless of the material used, is a long cylindrical shell. Several methods have been recommended for analyzing the operation of cylindrical shells. Simplified equations derived by Shorer [10] can be used. A more complete system of equations, which, however, requires a lot of computational work, was formulated by Jenkins [11]. The main analytical methods for their calculation were developed in the last century. These are the moment-free and moment theories of shells, and

the semi-moment theory [12]. The issues of strength and crack resistance of reinforced concrete cylindrical shells have long attracted the attention of scientists [13]. This interest does not wane even now. We note the works [14-17].

The analysis of the literature shows that very little attention is paid to the development of new methods for calculating reinforced concrete and steel-fiber concrete cylindrical shells, so this direction is relevant.

3 PURPOSE AND TASKS OF THE STUDY

The purpose of the work is the application of the numerical-analytical boundary elements method to the calculation of reinforced concrete and fiber-reinforced concrete culverts.

To achieve the set purpose, it is necessary to apply the numerical-analytical boundary elements method to the calculation of a culvert, which is considered as a circular cylindrical shell, to perform a numerical analysis of the pipe using the finite element method and to conduct a comparative analysis of the results obtained by the two methods.

4 MATERIALS AND METHODS OF RESEARCH

Reinforced concrete and fiber concrete cylindrical shells are considered. Computer modeling methods, methods of higher mathematics, numerical-analytical boundary element method, finite element method are used.

5 RESEARCH RESULTS

Consider a culvert (Fig. 1), which from the point of view of structural mechanics is a closed circular cylindrical shell of constant thickness. We will assume that the shell is rigidly clamped at the ends, rests on two intermediate supports and is under the action of uniform external pressure. The beam model of such a shell is presented in Fig. 2.



Fig. 1. Culvert

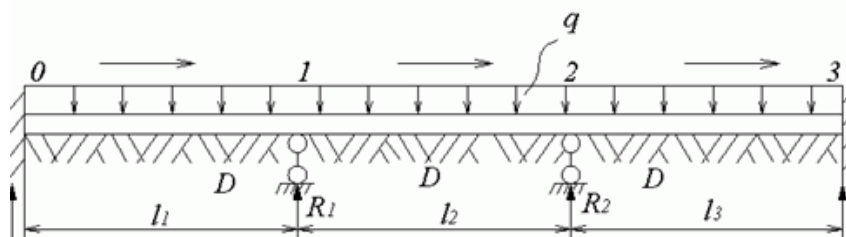


Fig. 2. Closed circular cylindrical shell loaded with uniformly distributed pressure

A detailed description of the numerical-analytical boundary element method and examples of its implementation can be found in [18].

The algorithm for calculating a cylindrical shell is as follows:

- we break the shell (replacing its beam) into several modules. In this case, since it is assumed that the pipe rests on two intermediate supports, there will be three such modules;
- we form matrices of initial and final parameters and the load vector, taking into account the boundary conditions, equilibrium equations and compatibility equations of the displacements of nodes 1 and 2.

Each module as a one-dimensional physical body has only two boundary points – $x=0$ and $x=l$. If the coordinate x of each rod is given the boundary value l_i , then a sufficiently simple transformation can be performed according to the scheme

$$\vec{Y}(l) = \bar{A}(l)\vec{X}(0) + \vec{B}(l) \rightarrow \bar{A}(l)\vec{X}(0) - \vec{Y}(l) = -\vec{B}(l) \rightarrow \bar{A}_*(l)\vec{X}_*(0, l) = -\vec{B}(l), \quad (1)$$

where the finite boundary parameters of the matrix \vec{Y} are transferred to the place of the zero parameters of the vector \vec{X} . In this case, these vectors are supplemented with equations of equilibrium and commonality of displacements of nodal points and boundary conditions. At the end of the transformation scheme (1) we have a system of linear equations for the initial and final parameters of all modules of the structure. After calculating the initial parameters of the modules, their stress-strain state is determined by the matrix equation

$$\vec{Y}(x) = \bar{A}(x)\vec{X}(0) + \vec{B}(x). \quad (2)$$

Thus, the solution of direct problems of structural mechanics of rod systems in the NA BEM is reduced to the solution of one system of linear algebraic equations and the calculation of the stress-strain state at the internal points of the rods according to the ratio of the initial parameter method. Such a solution scheme ensures obtaining very accurate results.

The main operation in scheme (1) is the transfer of parameters from \vec{Y} to \vec{X} . The process of transferring the final parameters of a vector \vec{Y} to a vector \vec{X} is based on the following provisions. Vectors of any rod (and non-rod) structure at the limit value of the coordinate $x=l_i$ will contain 3 groups of parameters. The first group is the zero boundary parameters, determined by the given support conditions (boundary conditions). The second group is the dependent parameters, related to each other by the equations of equilibrium and the commonality of displacements of the structural nodes. The third group of boundary parameters is not related to each other. These parameters can be conditionally called independent. Transferring parameters from vector \vec{Y} to vector \vec{X} must be compensated by non-zero elements of the matrix \bar{A} , otherwise the original equation of the scheme (1) is violated.

It is obvious that the independent parameters of the vector \vec{Y} must be transferred to the place of the zero parameters of the vector \vec{X} , and the dependent parameters are transferred according to the equations of their connection.

Before the parameter transfer operation, it is necessary to free the matrix \bar{A} fields from elements associated with zero parameters of the vector \vec{X} , i.e., to zero the columns of the matrix \bar{A} , the numbers of which are equal to the numbers of zero rows of the vector \vec{X} . Next, non-zero compensating elements are introduced into the matrix \bar{A} and the transformations according to scheme (1) are completed, since only the signs of the elements change in the matrix \vec{B} [18].

We write the equation of the boundary value problem in the form

$$\bar{A}\bar{X}_* = \bar{B}, \tag{3}$$

where

$$\bar{X}_* = \begin{pmatrix} Q^{0-1}(l_1) \\ Q^{1-2}(l_2) \\ M^{0-1}(0) \\ ; Q^{0-1}(0) \\ M^{2-3}(l_3) \\ D\phi^{1-2}(0) \\ M^{1-2}(0) \\ Q^{1-2}(0) \\ Q^{2-3}(l_3) \\ D\phi^{1-2}(0) \\ M^{1-2}(0) \\ Q^{1-2}(0) \end{pmatrix}; \bar{B} = \begin{pmatrix} B_{11}^{0-1}(l_1) \\ B_{21}^{0-1}(l_1) \\ B_{31}^{0-1}(l_1) \\ B_{41}^{0-1}(l_1) \\ B_{41}^{1-2}(l_2) \\ B_{21}^{1-2}(l_2) \\ B_{31}^{1-2}(l_2) \\ B_{41}^{1-2}(l_2) \\ B_{11}^{2-3}(l_3) \\ B_{21}^{2-3}(l_3) \\ B_{31}^{2-3}(l_3) \\ B_{41}^{2-3}(l_3) \end{pmatrix}.$$

The matrix \bar{A} of fundamental functions in (1) after the above transformations has the form

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -A_{13} & -A_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -A_{23} & -A_{24} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & A_{34} & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & A_{43} & A_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{12} & -A_{13} & -A_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{22} & -A_{23} & -A_{24} & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -A_{32} & A_{33} & A_{34} & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -A_{42} & A_{43} & A_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{12} & -A_{13} & -A_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Analytical expressions of fundamental functions (components of this matrix) are obtained in [18] for all possible roots of the characteristic equation corresponding to the differential equation of the problem.

Solving system (3), we obtain the kinematic and static parameters of the stress-strain state of the shell.

6 DISCUSSION OF RESEARCH FINDINGS

In accordance with the given algorithm, the calculation of the fiber concrete culvert under the action of uniform external pressure was performed (Fig. 3).

As a result of the implementation of the algorithm in SCILAB [19], the values of deflections, angles of rotation, bending moments, transverse forces and stresses were calculated.

Numerical values of deflections and tension, calculated with a step of 1 m at the points of the upper forming shell, are given in the table. 1.

The finite-element model of the pipe is built in the ANSYS program [20].

Here, as in SCILAB, the values of deflections, angles of rotation, bending moments, transverse forces and stresses are calculated (Table 1). The tension and displacement diagrams are shown in fig. 4.

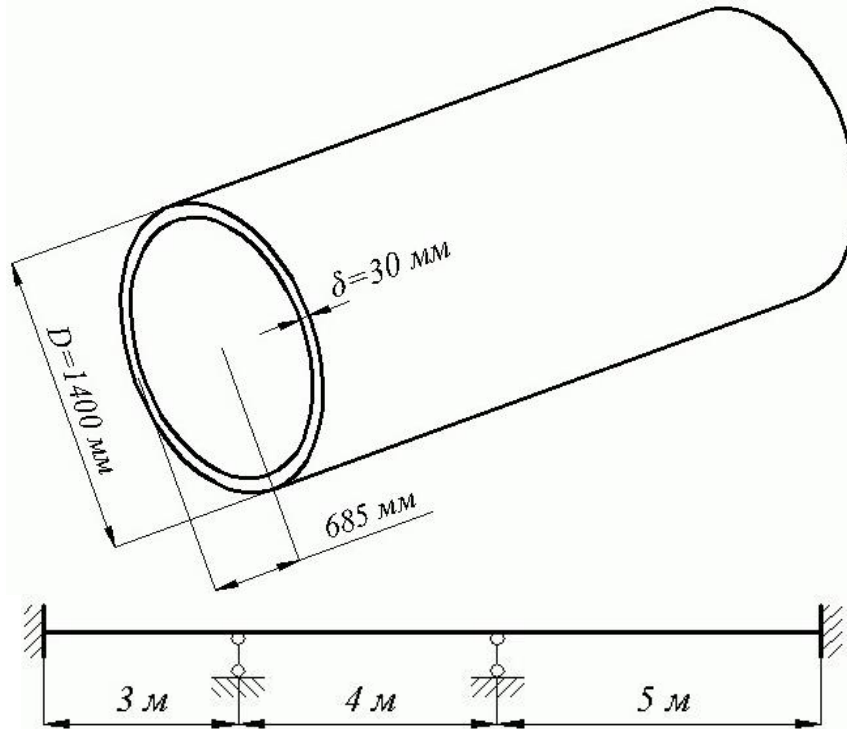


Fig. 3. Calculation scheme of a water culvert

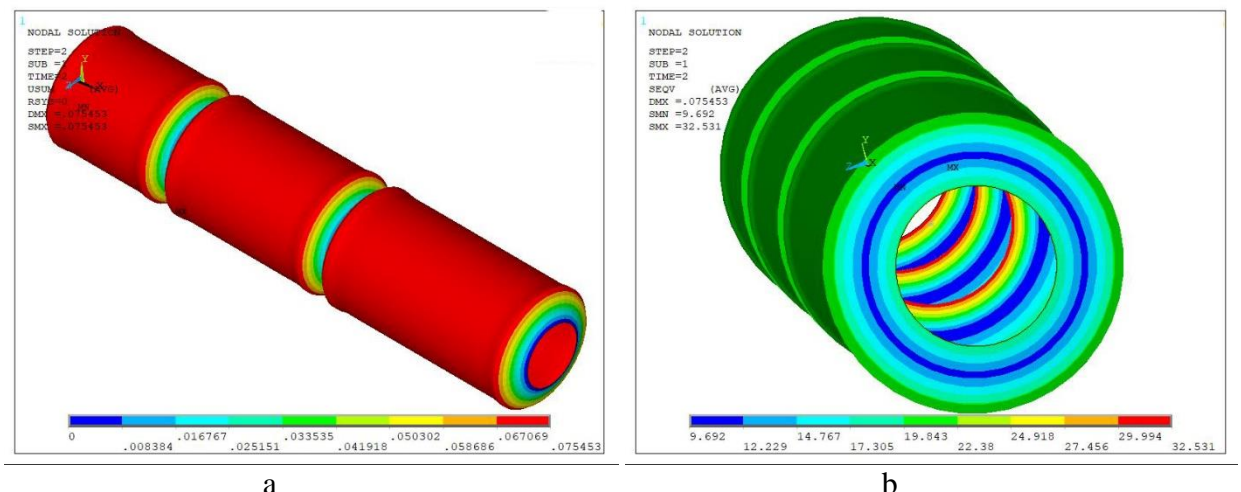


Fig. 4. Stresses (a) and displacements (b) in the water culvert

Table 1

Stresses and displacements in the fiber concrete water culvert

Coordinate along the axis, m	МГЭ, SCILAB		МКЭ, ANSYS	
	Stresses, MPa	Displacement, mm	Stresses, MPa	Displacement, mm
1	20,871	0,7133	20,796	0,7132
2	20,644	0,6803	20,796	0,6830
3	32,743	0,0164	32,530	0,0162
4	20,643	0,7103	20,796	0,7139
5	20,675	0,7137	20,792	0,7130
6	20,912	0,7139	20,796	0,7130
7	32,743	0,0164	32,530	0,0162
8	20,716	0,7131	20,796	0,7140
9	20,715	0,7101	20,792	0,7130
10	20,715	0,7108	20,792	0,7130
11	20,779	0,7135	20,796	0,7139

7 CONCLUSIONS

Thus, the method of applying the numerical analytical method of boundary elements to the calculation of reinforced concrete and fiber concrete culverts is proposed. In accordance with the given algorithm, the calculation of the culvert for the action of external pressure was performed. As a result of the implementation of the algorithm in SCILAB, the values of deflections, angles of rotation, bending moments, transverse forces and stresses were calculated. In order to verify the obtained results, computer modeling of the pipe and finite-element analysis of its stress-strain state were performed in the ANSYS program. A comparison of the stressed and displaced values obtained by the two methods shows that the maximum discrepancy between the stressed and displaced values is 0.65%, and the displaced value is 0.51%, which indicates the effectiveness of the proposed calculation method.

8 ETHICAL DECLARATIONS

The authors have no relevant financial or non-financial interests to report.

References

1. Mastanzade N.S., Rasulov H.I., Rustamli T.M., Altun F. Research in stress-strain state of underground fiber-concrete pipes. *Construction Materials*. 2019. No. 10. Pp. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-16-21>
2. Kaskiv V.I. Deformations determined by the conditions of static operation of the pipe in the "embankment - pipe - base" structure / V. I. Kaskiv, O. S. Chechuga, O. P. Lysenko, A. M. Lysenko // *Highways and road construction. Scientific and technical collection*. K.: NTU, 2012. Issue. 82. P.173 – 180. [in Ukrainian].
3. Calculation and construction of reinforced concrete culverts: a textbook / V.K. Zhdanyuk, V.P. Kozhushko, O.G. Kislov, V.S. Tytar. Kharkiv: KhNADU, 2011. 200 p. [in Ukrainian].
4. Andriychuk O.V. Steel-fiber concrete pressureless pipes: monograph / O.V. Andriychuk, E.M. Babych. Lutsk: RVV Lutsk NTU, 2012. 150 p. [in Ukrainian].
5. Doroshenko Yu., Doroshenko O., Chyzhenko N., Gudymenko K. Dispersion-reinforced concrete – a reliable and effective material for transport construction // *Transport Construction of Ukraine*. 2007. No. 121 (5) Pp. 16 – 19. [in Ukrainian].
6. Drobishynets S. Ya. Research on the mechanical characteristics of steel fiber concrete during

- repeated compression and tension // Prospects for the development of building structures, buildings, structures and their foundations: Interdepartmental scientific and technical collection. Kyiv: NIIBK, 2003. Issue 58: Pp. 39 – 45. [in Ukrainian].
7. Peng, Shilong & Rong, Chuanxin & Cheng, Hua & Wang, Xiaojian & Li, Mingjing & Tang, Bin & Li, Xuemei. (2019). Mechanical Properties of High-Strength High-Performance Reinforced Concrete Shaft Lining Structures in Deep Freezing Wells. *Advances in Civil Engineering*. 2019. 10.1155/2019/2430652.
 8. Kwon S-H, Ferron R.P., Akkaya Y., Shah S.P. Cracking of fiber-reinforced self-compacting concrete due to restrained shrinkage. // *International journal of concrete structures and materials*, vol.1, pp. 3-9, Dec. 2007.
 9. Yusuf M., Isak A., Mohamud G., Warsame A., Osman Y., Ibrahim A. and Elmi L. (2023) Effect of Steel Fiber on Concrete's Compressive Strength. *Open Journal of Civil Engineering*, vol 13, Pages 192-197, ISSN 2164-3172, <https://doi.org/10.4236/ojce.2023.131014>.
 10. Schorer, H. (1935): Line load action on thin cylindrical shells, *Proc. ASCE*. 281 p.
 11. Jenkins, R. S. (1947): 'Theory and Design of Cylindrical Shell Structures' O. V. Arup, London.
 12. Krutii Yu.S. Methods of calculating cylindrical shells. Monograph/ Krutii Yu.S., Surianinov M.G., Chuchmai O.M.// Odesa: ODABA, 2018, 182 p. [in Ukrainian].
 13. Kan S.N., Kaplan Y.I., Calculation of cylindrical shells of building coverings. Year: 1973. Publisher: Higher School 244 p. [in Ukrainian].
 14. Tanaka, Masafumi & Mashita, Kazuhiko. (2010). Retrofitted strength of concrete cylindrical shells reinforced with single layer under concentrated load. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*. 75. 1681-1689. 10.3130/aajs.75.1681.
 15. Karpov, Vladimir & Semenov, Alexey. (2013). Mathematical model of deformation of orthotropic reinforced shells of revolution. *Magazine of Civil Engineering*. 40. 100-106. 10.5862/MCE.40.11.
 16. Shen Li, Do Kyun Kim, Qing Quan Liang. Fibre-Based modelling for predicting the progressive collapse of cylindrical shells under combined axial compression and bending moment, *Engineering Structures*, Volume 272, 2022, 114988, ISSN 0141-0296, doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114988.
 17. Rong Li, Meng Yang, Bin Liang. A new and convenient method for strength evaluation of cracked cylindrical shell based on the ratio of crack tip stresses. *Structures*, Volume 52, 2023, Pages 146-157, ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.130>.
 18. Dashchenko A.F., Kolomiets L.V., Orobey V.F., Surianinov M.G. Numerical-analytical method of boundary elements. Odesa: VMV, 2010. In 2 volumes. Vol. 1. 416 p. Vol. 2. 512 p. [in Ukrainian].
 19. Fetisov V. S. Mathematical system Scilab: teaching-methodical manual. 2nd ed., revised and supplemented. Nizhyn: NDU named after M. Gogol, 2022. 82 p. [in Ukrainian].
 20. Lazarieva D.V. Techniques for working with the ANSYS PC when solving problems in mechanics. Edited by M.G. Surianinov: monograph/ Lazareva D.V., Soroka M.M., Shilyaev O.S., Surianinov M.G.// Odesa: ODABA, 2020. 432 p.[in Ukrainian].

Література

1. Mastanzade N.S., Rasulov H.I., Rustamli T.M., Altun F. Research in stress-strain state of underground fiber-concrete pipes. *Construction Materials*. 2019. No. 10. Pp. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-775-10-16-21>
2. Каськів В.І. Деформації, які визначаються умовами статичної роботи труби в конструкції "насип – труба – основа" / В. І. Каськів, О. С. Чечуга, О. П. Лисенко, А. М. Лисенко // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Науково-технічний збірник*. К.: НТУ, 2012. Вип. 82. С.173 – 180.
3. *Розрахунок та будівництво залізобетонних водопропускних труб: навчальний посібник* / В.К. Жданюк, В.П. Кожушко, О.Г. Кіслов, В.С. Титар. Харків: ХНАДУ, 2011. 200 с.
4. Андрійчук О.В. Сталефібробетонні безнапірні труби: монографія / О.В. Андрійчук, Є.М. Бабич. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2012. 150 с.
5. Дорошенко Ю., Дорошенко О., Чиженко Н., Гудименко К. Дисперсно-армований бетон – надійний та ефективний матеріал для транспортного будівництва // *Транспортное*

- строительство Украины. 2007. № 121 (5) С. 16 – 19.
6. Дробишинець С. Я. Дослідження механічних характеристик сталевібробетону при повторному стисненні та розтягненні // Перспективи розвитку будівельних конструкцій, будівель, споруд та їх основ: Міжвідомчий науково-технічний збірник. К.: НДІБК, 2003. Вип. 58: С. 39 – 45.
 7. Peng, Shilong & Rong, Chuanxin & Cheng, Hua & Wang, Xiaojian & Li, Mingjing & Tang, Bin & Li, Xuemei. (2019). Mechanical Properties of High-Strength High-Performance Reinforced Concrete Shaft Lining Structures in Deep Freezing Wells. *Advances in Civil Engineering*. 2019. 10.1155/2019/2430652.
 8. Kwon S-H, Ferron R.P., Akkaya Y., Shah S.P. Cracking of fiber-reinforced self-compacting concrete due to restrained shrinkage. // *International journal of concrete structures and materials*, vol.1, pp. 3-9, Dec. 2007.
 9. Yusuf M., Isak A., Mohamud G., Warsame A., Osman Y., Ibrahim A. and Elmi L. (2023) Effect of Steel Fiber on Concrete's Compressive Strength. *Open Journal of Civil Engineering*, vol 13, Pages 192-197, ISSN 2164-3172, <https://doi.org/10.4236/ojce.2023.131014>.
 10. Schorer, H. (1935): Line load action on thin cylindrical shells, *Proc. ASCE*. 281 p.
 11. Jenkins, R. S. (1947): 'Theory and Design of Cylindrical Shell Structures' O. V. Arup, London.
 12. Крутий Ю.С. Методи розрахунку циліндричних оболонок. Монографія/ Крутий Ю.С., Сур'янінов М.Г., Чучмай О.М.// Одеса: ОДАБА, 2018, 182 с.
 13. Кан С.Н., Каплан Ю.І., Розрахунок циліндричних оболонок покриттів будівель. Рік: 1973р. Видавництво: Вища школа 244 с.
 14. Tanaka, Masafumi & Mashita, Kazuhiko. (2010). Retrofitted strength of concrete cylindrical shells reinforced with single layer under concentrated load. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*. 75. 1681-1689. 10.3130/aijs.75.1681.
 15. Karpov, Vladimir & Semenov, Alexey. (2013). Mathematical model of deformation of orthotropic reinforced shells of revolution. *Magazine of Civil Engineering*. 40. 100-106. 10.5862/MCE.40.11.
 16. Shen Li, Do Kyun Kim, Qing Quan Liang. Fibre-Based modelling for predicting the progressive collapse of cylindrical shells under combined axial compression and bending moment, *Engineering Structures*, Volume 272, 2022, 114988, ISSN 0141-0296, doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114988.
 17. Rong Li, Meng Yang, Bin Liang. A new and convenient method for strength evaluation of cracked cylindrical shell based on the ratio of crack tip stresses. *Structures*, Volume 52, 2023, Pages 146-157, ISSN 2352-0124, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.130>.
 18. Дащенко А.Ф., Коломієць Л.В., Оробей В.Ф., Сур'янінов М.Г. Чисельно-аналітичний метод граничних елементів. Одеса: ВМВ, 2010. У 2-х томах. Т.1. 416 с. Т.2. 512 с.
 19. Фегісов В. С. Математична система Scilab: навч.-метод. посібн. 2-е вид., перероб. і доп. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2022. 82 с.
 20. Лазарева Д.В. Прийоми роботи з ПК ANSYS при розв'язанні задач механіки. Під редакцією М.Г. Сур'янінова: монографія/ Лазарева Д.В., Сорока М.М., Шил'яєв О.С., Сур'янінов М.Г.// Одеса: ОДАБА, 2020. 432 с.

Yurii Krutii

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture
Doctor of Science, Professor
Didrihsona str., 4, Odessa, Ukraine, 65052
yurii.krutii@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7105-3087

Vladimir Osadchiy

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture
Ph.D., Associate Professor
Didrihsona str., 4, Odessa, Ukraine, 65052
ovs1455@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8153-8635



Viacheslav Surianinov

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture
Assistant
Didrihsona str., 4, Odessa, Ukraine, 65052
citykboss@odaba.edu.ua
ORCID: 0009-0006-9620-4287

For references:

Yu. Krutii, V. Osadchiy, V. Surianinov. (2025). Calculation of culver pipe by the numerical –analytical boundary elements method. *Mechanics and Mathematical methods*. 7 (1). 15–25.

Для посилань:

Крутий Ю. С., Осадчий В. С., Сур'янінов В. М. Розрахунок водопропускної труби чисельно-аналітичним методом граничних елементів. *Механіка та математичні методи*, 2025. Т. 7. № 1. С. 15–25.

УДК 614.841

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ОПОВІЩЕННЯ ТА ЕВАКУАЦІЇ ДІТЕЙ З ПОРУШЕННЯМ СЛУХУ У ЗАКЛАДАХ ОСВІТИ

Щолоков Е. Е.¹, Майборода Р. І.¹, Рашкевич Н. В.², Отрош Ю. А.¹,
Балдук П. Г.³

¹Національний університет цивільного захисту України

²Черкаський державний технологічний університет

³Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація: У статті досліджено ефективність сучасної системи оповіщення та управління евакуацією дітей з особливими освітніми потребами (з порушенням слуху) у випадку пожеж у навчальних закладах. Дослідження спрямоване на вдосконалення існуючих підходів до інклюзивного навчання та забезпечення безпеки дітей у надзвичайних ситуаціях.

У ході дослідження були вирішені наукові завдання: проведено аналіз сучасних систем оповіщення та управління евакуацією в Україні; обґрунтовано математичну модель для оцінки ефективності таких систем; здійснено моделювання часу евакуації дітей за допомогою програмного комплексу Pathfinder у реальних умовах навчального закладу.

Аналіз нормативної бази, чинної на території України, засвідчив, що існуючі технічні засоби оповіщення та управління евакуацією орієнтовані переважно на учнів без особливих освітніх потреб. Як наслідок, вони не можуть повною мірою виконати свою функцію для дітей з порушенням слуху, що створює загрозу їхній безпеці у разі виникнення пожежі.

Математична модель оцінки ефективності системи оповіщення повинна враховувати основні принципи безпечної евакуації: завершення евакуації до настання критичних значень небезпечних чинників пожежі; можливість безперешкодного руху евакуаційними шляхами; управління рухом дітей з особливими освітніми потребами за допомогою звукових, світлових та мовленнєвих засобів оповіщення; коригування параметрів часу евакуації з урахуванням поведінкових особливостей у стресових умовах.

Розрахункова частина дослідження виконана у програмному комплексі Pathfinder на прикладі дошкільного навчального закладу для дітей з порушенням слуху. Було розглянуто два сценарії евакуації: без удосконаленої системи оповіщення та з її впровадженням. Результати моделювання підтвердили ефективність системи оповіщення, до складу якої входять: програмне забезпечення для виведення інформації та організації пожежного пульта моніторингу; пожежний приймально-контрольний прилад; блок центрального контролера; блок живлення; блок підсилювача потужності; блок комутації; акустичні системи; вібраційні системи; сповіщувачі світло-звукові та світлові; світлові покажчики у вигляді мерехтливих світлових доріжок; пожежні сповіщувачі; ручні пожежні сповіщувачі; пристрій безпровідного з'єднання; індивідуальні сповіщувачі у вигляді вібраційних браслетів; шлейф з'єднання. Данна система дозволяє суттєво скоротити час евакуації завдяки зменшенню затримок, пов'язаних з пробудженням вихователями дітей, які перебували у стані сну, а також виключає вплив людського фактора.

Ключові слова: пожежа, системи оповіщення, евакуація, Pathfinder.

RESEARCH EFFECTIVENESS OF THE MODERN SYSTEM OF NOTIFICATION AND EVACUATION OF CHILDREN WITH HEARING IMPAIRMENTS IN EDUCATIONAL INSTITUTIONS

E. Shcholokov¹, R. Maiboroda¹, N. Rashkevich², Yu. Otrosh¹, P. Balduk³

¹*National University of Civil Defence of Ukraine*

²*Cherkasy State Technological University*

³*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

Abstract: The article investigates the effectiveness of a modern system for alerting and managing the evacuation of children with special educational needs (with hearing impairment) in the event of fires in educational institutions. The study is aimed at improving existing approaches to inclusive education and ensuring the safety of children in emergency situations.

The study analyzed modern alerting and evacuation management systems in Ukraine. The authors substantiated a mathematical model for assessing the effectiveness of such systems. The authors simulated the evacuation time of children using the Pathfinder software package in real conditions of an educational institution.

The researchers found that existing technical means of alerting and managing evacuation are focused mainly on students without special educational needs. As a result, they cannot fully fulfill their function for children with hearing impairment, which poses a threat to their safety in the event of a fire.

The mathematical model for assessing the effectiveness of the alerting system should take into account the basic principles of safe evacuation: completing the evacuation before the critical values of dangerous fire factors are reached; the possibility of unhindered movement along evacuation routes; movement control of children with special educational needs using sound, light and speech means of notification; adjustment of evacuation time parameters taking into account behavioral characteristics in stressful conditions.

The calculated part of the study was performed in the Pathfinder software package on the basis of a preschool educational institution for children with hearing impairments. Two evacuation scenarios were considered: without an improved notification system and with its implementation. The modeling results confirmed the effectiveness of the notification system, which includes: software for displaying information and organizing a fire monitoring console; fire receiving and control device; central controller unit; power supply unit; power amplifier unit; switching unit; acoustic systems; vibration systems; light-sound and light detectors; light indicators in the form of flickering light paths; fire detectors; manual fire detectors; wireless connection device; individual detectors in the form of vibrating bracelets; connection loop. This system allows you to significantly reduce evacuation time by reducing delays associated with waking up sleeping children by caregivers, and also eliminates the influence of the human factor.

Keywords: fire, warning systems, evacuation, Pathfinder.

1 ВСТУП

Під час надзвичайних ситуацій та пожеж, потрібна чітка та швидка організація евакуації всіх учасників освітнього процесу [1]. Проте стандартні системи оповіщення (СО) часто є недостатньо ефективними для дітей з порушенням слуху, що може призводити до затримок у реагуванні на виникнення загроз. Це підкреслює актуальність проведення дослідження ефективності систем оповіщення та евакуації дітей з метою підвищенню рівня безпеки у закладах освіти та забезпечення рівноправного доступу до захисту.

Недотримання основних правил пожежної безпеки, відсутність ефективних протипожежних систем і використання застарілих будівель без модернізації стали ключовими причинами, що призвели до трагедії в Одеському коледжі (рис. 1).



Рис. 1. Пожежа в Одеському коледжі економіки, права та готельно-ресторанного бізнесу (м. Одеса, Україна).

Зокрема, 27 березня 2019 року сталася пожежа в будівлі дошкільного навчального закладу в місті Кривий Ріг (рис. 2). Вогонь виник у приміщенні музичного кабінету, розташованого на другому поверсі двоповерхової будівлі. Для гасіння пожежі було залучено 15 рятувальників. До прибуття підрозділів ДСНС співробітники дитячого садка евакуювали 115 осіб, з яких 87 були діти. Причиною загоряння стало коротке замикання електричної мережі.



Рис. 2. Пожежа в будівлі дошкільного навчального закладу (м. Кривий Ріг, Україна)

Подібний випадок трапився в ніч на 30 жовтня 2021 році у місті Тетіїв, Білоцерківського району, Київської області, де пожежа виникла в холі навчального класу (рис. 3). Внаслідок цього було пошкоджене облицювання стін та майно в прилеглому класі. Основною причиною займання стало порушення встановлених законодавством вимог пожежної безпеки.



Рис. 3. Наслідки пожежі в школі (м. Тетіїв, Україна)

Ще одна пожежа сталася 9 лютого 2021 році в приміщенні закладу дошкільної освіти в селі Харитонівка, Житомирської області (рис. 4). Дитячий садок був розташований під однією покрівлею із закладом середньої освіти. Після виявлення займання було евакуйовано 30 дітей та 18 осіб персоналу. Осередок пожежі знаходився у спальному приміщенні, внаслідок чого було знищено майно в кімнаті та пошкоджено внутрішнє оздоблення стін. Причиною пожежі стало коротке замикання електромережі.



Рис. 4. Пожежа в будівлі дошкільного навчального закладу (с. Харитонівка, Україна)

Також, в ніч на 1 лютого 2023 року в селі Сабатинівка, Голованівського району, Кіровоградської області, виникла пожежа в дитячому садку (рис. 5). Осередок займання знаходився на горищі будівлі, що призвело до значних руйнувань: було пошкоджено та зруйновано покрівлю та перекриття будівлі на площі 600 м². Причиною пожежі стало порушення правил експлуатації печей та димарів.



Рис. 5. Пожежа в дитячому садку (с. Сабатинівка, Україна)

Випадки пожеж у закладах освіти свідчать про необхідність удосконалення протипожежних систем, розробки ефективних заходів евакуації та впровадження спеціалізованих систем оповіщення для всіх категорій населення, зокрема для осіб з порушенням слуху. Це забезпечить своєчасне реагування та збереже життя дітей і персоналу закладів освіти.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Подібна проблематика оповіщення дітей і людей з вадами слуху неодноразово розглядалася в наукових працях. Деякі з них зазначають про необхідність розроблення нових систем для вирішення проблеми оповіщення людей з сенсорними порушеннями (з вадами слуху, зору та інше) за рахунок застосування підсилювачів та звукових генераторів [2]. Можливе індивідуальне оповіщення про пожежу за допомогою мобільних телефонів [3, 4], або контроль наявності людей в будівлі за допомогою пристрою, що дозволяє фіксувати їх перебування у вказаній зоні [5], відсутність методів та методик щодо оцінки ефективності СО на стадії проектування так і під час її експлуатації [6]. Проведеними дослідженнями визначено, що навіть спрацювання СО не гарантує того що люди, негайно вчинять негайні дії з евакуації. Окрім використання сигналів евакуації, додаткових підказок, включаючи повідомлення голосового зв'язку, потрібні також додаткові інструктажі персоналу, навчання та розроблення планів дій у надзвичайних ситуаціях [7–9].

Дослідження ефективності існуючих систем оповіщення та евакуації у закладах освіти свідчать про значні прогалини у врахуванні потреб дітей з порушенням слуху.

Результати аналізу джерел показують, що в більшості закладів освіти використовується стандартне звукове сповіщення, яке є малоефективним для цієї категорії учнів [10]. Дослідники пропонують методи оцінювання систем на основі критеріїв часу реакції, зрозумілості сигналів та доступності інформації.

В [11] наведені результати дослідження характеристик евакуації людських потоків з включенням до їх числа маломобільних груп населення. Було прораховано 15 сценаріїв з участю різної кількості агентів. На середню швидкість агентів негативно впливають частка людей з обмеженими можливостями. Зі збільшенням частки інклюзивних пішоходів небезпека натовпу збільшується. Дане дослідження корисне для проектування безпечної евакуації за допомогою комп'ютерного моделювання та для зменшення утворення скупчень різних груп мобільності під час евакуації з будівлі.

В [12] дослідили евакуацію людей із застосуванням алгоритму Дейкстри та алгоритму оптимізації, що імітує рух колонії мурах (ACO) та запропонували покращений метод евакуації DACO (Dijkstra-ant colony optimization). Мета дослідження полягала в проектуванні. Результати досліджень підтверджують, що алгоритм DACO є більш досконалим в порівнянні з алгоритмом Дейкстри.

В [13] запропонували модель евакуації з використанням клітинних автоматів. Цей алгоритм об'єднує клітинні автомати з моделлю потенційного енергетичного поля в теорії руху людських потоків для вибору безпечних шляхів евакуації натовпу і зниження імовірності виникнення тисняви. Для збору інформації про пожежу та натовп були використані спеціально розроблені бездротові датчики, удосконалені камери спостереження з штучним інтелектом, інтелектуальні системи аварійних вивісок, котрі регулюють евакуацію в мовах реального часу. Також в роботі описані результати моделювання алгоритму на двовимірній площині, яка створена на базі будівлі лікарні аеропорту Пекіну. Моделювання показало, що середній час евакуації значно покращився. Максимальне покращення становило 72% в порівнянні з сценаріями, в яких використовували звичайні евакуаційні знаки. Результати дослідження продемонстрували, що запропонована модель зменшує час евакуації особливо добре в місцях з великою кількістю людей. Результати роботи будуть використані для проведення натурального експерименту наших досліджень.

В [14] представили методологію розробки планів евакуації шляхом проведення моделювання руху пішоходів з агентами, що мають модель свого оточення. Цей підхід дозволяє оцінити різні сценарії і вибрати найкращий варіант на основі конкретних характеристик ділянки. Метод об'єднує моделювання і аналіз даних, використовуючи метод Монте – Карло для покращення екстреної евакуації. Для моделювання висотної будівлі був застосований програмний комплекс Pathfinder. Наші дослідження базуються на програмному комплексі Pathfinder.

В [15] описали теорію моделювання для евакуації людей з вадами руху, в якій застосовані спеціальні дані для евакуаційних інструментів, що керують рухом агентів (наприклад вертикальні швидкості руху, котрі в середньому сягають від 0,6 м/с до 0,84 м/с в залежності від пристрою переміщення агента). В роботі запропоновані алгоритми, що розраховують рух евакуаційних пристроїв (ліжок, крісел-каталок) через дверні прорізи і при русі по сходам, та включають в себе метод геометричного розташування доступних маршрутів з лікарні. Цей новий спосіб враховує ключові компоненти евакуації, коли пацієнти збираються повторно і має багато застосувань, як в моделюванні евакуації з лікарні, так і з інших приміщень, де присутні маломобільні люди. Функціональність методу була протестована і становить в межах 6% від очікуваної продуктивності. Після завершення подальшого тестування інструмент може бути використаний для значного розширення планування та діагностичних можливостей, пов'язаних з евакуацією з лікарень та інших медичних закладів.

В [16] розглянули вплив фізичних зіткнень людей (occupant physical collisions – OPC) на евакуацію та запропонували метод віртуального тренування евакуації при пожежі в приміщеннях. Спершу для створення реалістичної сцени пожежі в приміщенні було застосовано моделювання з використанням інформаційного моделювання будівлі та алгоритм візуалізації диму на основі моделювання розрахункової гідродинаміки пожежі. Приклад віртуальної евакуації показав, що найбезпечніший спосіб евакуації істотно відрізняється при врахуванні OPC. Представлені результати дослідження дозволяють користувачам протестувати OPC у віртуальних навчаннях евакуації з приміщень та допоможуть обрати найбільш безпечний шлях евакуації.

Встановлено [17], що при евакуації досить часто на сходових клітинах утворюються потоки великої щільності (7-8 осіб/м²), які призводять до виникнення

скупчень (затворів), що, в свою чергу, призводить до збільшення часу виходу із будинку. Застосування наявної техніки, яка при максимальних характеристиках досягає лише 10-го поверху, має ряд недоліків: обмеженість маневреності при розгортанні й зміні положення, обмеженість кількості людей, що рухаються нею, тривалий час розгортання (встановлення – до 120 с, підйом та висунення колін – до 100 с), залежність від сторонніх чинників (швидкість вітру, обмеженість під'їзду та розмірів майданчику для розгортання, його покриття та кут ухилу до 6° тощо) [18, 19].

Виконана оцінка динаміки розвитку пожежі висотної будівлі шляхом визначення часу надходження небезпечних чинників пожежі у відсіку висотної будівлі шляхом використання програмного комплексу FDS (Fire dynamics Simulator) [20], за допомогою прикладного програмного забезпечення PYROSIM [21, 22], Pathfinder [23, 24]. Pathfinder дає візуалізоване тривимірне зображення процесу евакуації з можливим з'ясуванням причин затримки під час евакуації.

Також, дослідження вказують, що впровадження інформаційних табло із текстовими інструкціями у приміщеннях значно скорочує час евакуації. Крім того, важливим фактором є взаємодія таких систем із навчальним персоналом та спеціальними службами для швидкої координації дій під час надзвичайної ситуації.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження – дослідити ефективність сучасної системи оповіщення та управління евакуацією дітей з особливими освітніми потребами (вадами слуху) при пожежах для реалізації інклюзивного навчання у закладах освіти.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

1. Проаналізувати сучасні підходи щодо систем оповіщення та управління евакуацією в Україні.
2. Обґрунтувати математичну модель для оцінки ефективності системи оповіщення та управління евакуацією дітей з особливими освітніми потребами.
3. Провести моделювання часу евакуації дітей за допомогою ПК Pathfinder з начального закладу.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Аналіз сучасних підходів щодо систем оповіщення та управління евакуацією в Україні

Відповідно до нормативних документів СО про пожежу та управління евакуаванням людей призначена для оповіщення людей, що перебувають в будинку (споруді), про виникнення пожежі з метою створення умов для їх своєчасного евакуування.

Оповіщення здійснюється одним із таких способів або їх комбінацією:

- передачею звукових, а також, за необхідності, світлових сигналів оповіщення у всі приміщення будинку;
- трансляцією мовленнєвих повідомлень про пожежу;
- передачею в окремі зони будинку або приміщення повідомлень про місце виникнення пожежі, про шляхи евакуування та дії, що забезпечують особисту безпеку;
- увімкненням світлових покажчиків рекомендованого напрямку евакуування;
- увімкненням освітлення евакуування;
- для СО4 та СО5 типів - двостороннім зв'язком між приміщенням пожежного поста та зонами оповіщення.

За способами оповіщення СО ділиться на світлові (візуальні), звукові, мовленнєві та комбіновані.

СО з використанням світлової (візуальної) сигналізації складається із світлових оповіщувачів, світлових показчиків, знаків, табло або інших пристроїв, сигнальна інформація від яких створюється подачею сигналу управління. При цьому світлові (візуальні) системи оповіщення застосовуються у разі неможливості забезпечити оповіщення звуковими та мовленнєвими оповіщувачами.

СО з використанням звукової сигналізації складається із звукових пожежних оповіщувачів згідно з ДСТУ EN 54-3, що генерують звукові сигнали попередження про пожежу при подачі на них сигналу управління.

СО для забезпечення мовленнєвого оповіщення складається з устаткування управління та індикації і гучномовців згідно з ДСТУ-Н CEN/TS 54-14, ДСТУ EN 54-16 та ДСТУ EN 54-24 відповідно. Трансляція мовленнєвого повідомлення забезпечується ручним або автоматичним запуском устаткування управління та індикації.

Комбінована СО складається із світлової, звукової та/або мовленнєвої сигналізації.

Приведення в дію СО виконується:

- в автоматичному режимі сигналом від системи пожежної сигналізації (СПС);
- в ручному режимі оперативним персоналом із пожежного поста при отриманні сигналу від СПС або автоматична система пожежогасіння (АСПГ). При цьому ручний режим має найвищий пріоритет управління СО.

Оповіщення повинно виконуватись у всіх приміщеннях будинків (споруд) із постійним та тимчасовим перебуванням людей та, за необхідності, на прилеглий до будинку території.

Мовленнєві повідомлення про пожежу повинні бути короткими, ясними та зрозумілими.

У будівлях, де можливе перебування людей, що не володіють національною мовою, мовленнєві повідомлення повинні транслюватися на декількох мовах, але не більше ніж на чотирьох.

Допускається використовувати СО з радіоканальними з'єднувальними лініями, при цьому вони повинні бути забезпечені автоматичним контролем їх працездатності.

В залежності від призначення будинку, приміщення, площі, поверховості, кількості місць, умовної висоти, режиму роботи об'єкта обирається тип системи оповіщення

Таблиця 1

Типи СО

Характеристика СО та управління евакуюванням людей	Наявність зазначених характеристик у різних типів СО				
	1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6
1. Способи оповіщення: - звуковий (дзвінок, тнваний сигнал тощо);	+	+	*	*	*
- мовленнєвий (запис і передача спеціальних текстів);	-	-	+	+	+
- світловий: а) світловий сигнал, який блимає;	*	*	-	-	-
б) світлові показчики «Вихід»;	*	+	+	+	+
в) світлові показчики напрямку руху;	-	*	*	+	+
г) світлові показчики напрямку руху з включенням окремо для кожної зони	-	*	*	*	+
2. Зв'язок зони оповіщення з диспетчерською	-	-	*	+	+
3. Черговість оповіщення: - всіх одночасно;	*	+	-	-	-

Продовження таблиці 1					
1	2	3	4	5	6
- тільки в одному приміщенні (частині будинку);	*	*	*	-	-
- спочаку обслуговуючого персоналу, а потім усіх інших за спеціально розробленою черговістю	-	*	+	+	+
4. Повна автоматизація управління СО та можливість різних варіантів організації евакуування з кожної зони оповіщення	-	-	-	-	+

Примітка. У таблиці наведено такі позначки:
 «+» - вимагається;
 «*» - рекомендується;
 «-» - не вимагається.

СО із використанням мовленнєвого оповіщення за відсутності небезпечних ситуацій допускається використовувати в режимі трансляції музичних програм та іншої інформації з обов'язковим автоматичним вимкненням цього режиму при надходженні пожежної тривоги.

Для цікавої для нас категорії людей, тобто вадами слуху і слабочуючих осіб, у зв'язку із фізіологічними особливостями основними шляхами надходження інформації є - низькочастотна вібрація і зір.

При відключенні штучного освітлення або перебуванні у стадії сну глухі й діти які слабо чують, позбавляються взагалі інформації як про виникнення надзвичайної ситуації чи події, так і про необхідні дії з евакуації.

Наявні в Україні системи оповіщення призначені для попередження про наявність потенційно небезпечного стану за допомогою гучного пронизливого звуку та світлової індикації. Однак люди з вадами слуху не в змозі адекватно почути звук про небезпеку.

Для таких об'єктів слід передбачати окрім традиційних методів оповіщення додатково нові - вібраційні (вібраційні ліжка, браслети, подушки).

Щоб забезпечити виведення тривожних сигналів у разі пожежі на такі пристрої, необхідно автоматизувати їх із системою пожежної сигналізації з функцією контролю їх технічного стану та передбачених нормальних умов застосування.



Рис. 6. Орієнтована структура системи пожежної сигналізації та оповіщення та управління евакуацією для людей з порушенням слуху.

Опис позначень.

1. Програмне забезпечення для виведення інформації та організації пожежного пульта моніторингу.
2. Пожежний приймально-контрольний прилад.
3. Блок центрального контролера.
4. Блок живлення.
5. Блок підсилювача потужності.
6. Блок комутації.
7. Акустичні системи.
8. Вібраційні системи.
9. Сповіщувачі світло-звукові та світлові.
10. Світлові покажчики у вигляді мерехтливих світлових доріжок.
11. Пожежні сповіщувачі.
12. Ручні пожежні сповіщувачі.
13. Пристрій безпроводного з'єднання.
14. Індивідуальні сповіщувачі у вигляді вібраційних браслетів.
15. Шлейф з'єднання.

У зв'язку із тим що, нові запропоновані системи використовують для оповіщення тактильний спосіб, необхідно також провести дослідження для визначення відповідних рівнів вібрації в лабораторії сну для людей різної вікової групи та групи мобільності.

При задимленості шляхів евакуації світлові покажчики що розташовуються на стінах стають малопомітними, тому є необхідність у оснащенні додатковими світловими покажчиками у вигляді мерехтливих світлових доріжок до виходу, що дозволить краще людям орієнтуватися в темряві.

Для встановлення загальних однотипних принципів, характеристик, оптимального ступеня впорядкованості таких пристроїв, необхідно розробити та впровадити відповідний нормативний документ. Це дозволить майбутнім виробникам виготовляти стандартизовані пристрої.

Удосконалення наявних СО полягає в наступних заходах:

- система оповіщення повинна додатково включати вібраційні пристрої для ліжка/подушки та індивідуальні сповіщувачі (браслети) в кількості яка відповідає розрахункової кількості дітей;
- шляхи евакуації повинні бути оснащені світловими покажчиками у вигляді мерехтливих світлових доріжок до виходу, що дозволить краще орієнтуватися в темряві;
- технічні засоби системи мають бути виконані на сучасній елементній базі та містити інтелектуальну складову, що забезпечить управління евакуацією за відповідними алгоритмами залежно від розташування місця виникнення пожежі;
- обов'язковою умовою, що забезпечує колективну безпеку під час пожежі або НС, є навчання порядку та правил дії як посадових осіб, так і дітей з особливими освітніми потребами (порушенням слуху).

4.2. Обґрунтування математичної моделі для оцінки ефективності системи оповіщення та управління евакуацією дітей з особливими освітніми потребами

Забезпечення евакуації людей полягає у таких об'ємно-планувальних і конструктивних рішеннях, за яких евакуація з об'єкта завершується до настання гранично допустимих для людини значень небезпечних чинників пожежі, а при недоцільності евакуації - забезпечується засобами індивідуального та/або колективного захисту та рятування людей на об'єкті [11]. Для забезпечення евакуації необхідно:

- встановити кількість, розміри та відповідне конструктивне і планувальне виконання евакуаційних шляхів і виходів;

- забезпечити можливість безперешкодного руху людей евакуаційними шляхами;
- організувати, за необхідності, управління рухом людей евакуаційними шляхами (світлові покажчики, звукове і мовленнєве оповіщення, знаки безпеки тощо).

Відповідно до прийнятої світової практики умова безпечного евакуювання людей має наступне математичне відображення: $t_p \leq t_{bl}$ де, – розрахунковий час евакуації людей при пожежі з врахуванням часу початку евакуювання, хв; t_{bl} – необхідний час евакуації людей при пожежі (час від початку пожежі до блокування шляхів евакуації внаслідок розповсюдження на них небезпечних чинників пожежі, що мають гранично допустимі для людей значення), хв.

На даний час в світі розроблено і застосовуються математичні моделі, які використовуються для перевірки виконання умов безпечної евакуації людей з об'єктів, що відрізняються між собою складністю проведення розрахунків і точністю отриманих результатів. Для визначення розрахункового часу евакуації людей під час пожежі застосовуються наступні математичні моделі:

- аналітична модель;
- модель індивідуально-потокowego руху людей;
- модель імітаційно-стохастичного руху людей;
- інтегральна модель (інтегральний метод);
- зонна (зональна) модель (метод);
- польова модель (польовий метод).

На сьогоднішній день в Україні єдиним чинним нормативним документом згідно якого виконується перевірка виконання умов безпечного евакуювання людей під час пожежі являється [25]. У даному нормативному документі реалізовано інтегральну модель (метод) розрахунку необхідного часу евакуації людей при пожежі і аналітичну модель розрахунку часу евакуації людей.

Необхідно відмітити суттєві недоліки реалізованих методів розрахунків, а саме:

- не враховано вплив небезпечних чинників пожежі (НЧП) на швидкість руху потоку людей;
- не враховує частковий рух людей при виникненні скупчень;
- не враховано можливість евакуації пожежними ліфтами.

4.3. Моделювання часу евакуації дітей за допомогою ПК Pathfinder з начального закладу

Одним з найкращим програмним компонентом покладеного в швидкому та реалістичному розрахунку евакуації людей при пожежі в порівнянні з іншими розрахунковими програмами є – Pathfinder [24–28].

У [29] підкреслюється, що саме в моделі Pathfinder реалізований найбільш точний алгоритм, який передбачає інтелектуальний рух людей в потоці (маневрування, ухилення від зіткнення, прискорення при наявності вільного простору).

Pathfinder, як програма для моделювання евакуації у надзвичайних ситуаціях з урахуванням можливості порятунку людей, включає в себе користувальницький графічний інтерфейс для створення моделі та модуль для перегляду анімованих тривимірних результатів.

Дозволяє виконати розрахунок евакуації людей при пожежі швидше та реалістичніше, ніж інші розрахункові програми. Виконує розрахунок часу евакуації та часу існування скупчень за індивідуально-потоковой моделлю руху. Інтерфейс програми дозволяє задавати параметри розрахунку моделі відповідно значень ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення.

4.3.1. Моделювання порятунку маломобільних груп людей

Pathfinder дозволяє моделювати також порятунок немобільних людей силами персоналу на ношах, інвалідних кріслах та інших суднах. У вихідних даних задаються "клієнти" (агенти, яким потрібна допомога для руху) та "помічники" (агенти, які переміщують немобільних агентів) [26].

Програма дозволяє реалізувати різні варіанти поведінки під час порятунку: помічники можуть супроводжувати клієнта весь шлях до виходу або зони безпеки, а можуть передавати його від однієї команди рятувальників до іншої (наприклад, одна команда везе немобільну людину до ліфта, інша зустрічає внизу у ліфта), або надавати допомогу тільки на частині шляху (наприклад, допомогти агенту в кріслі-колясці при спуску сходами).

Об'єднання помічників у «команди допомоги» дозволяє враховувати обмеження кількості рейсів, відповідно до вимог методики.

Програма перегляду 3D-результатів реалістично відображає процес порятунку.

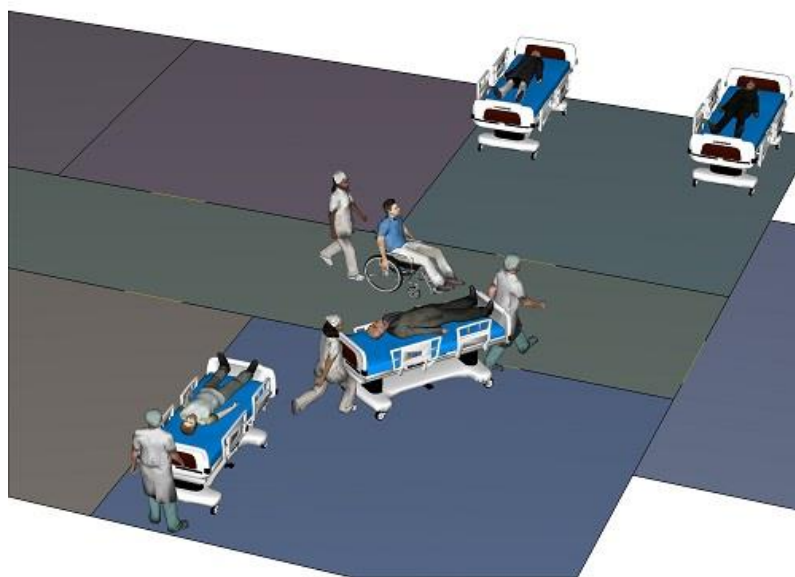


Рис. 7. Моделювання процесу евакуації пацієнтів з палат лікарень

4.3.2. Візуалізація полів НЧП разом із евакуацією людей.

У Pathfinder можна одночасно переглядати результати евакуації та результати моделювання поширення НЧП. За допомогою подібних зображень можна наочно проілюструвати, чи встигають евакуюватися люди до блокування шляхів евакуації. Для цього необхідно завантажити результати розрахунку Pyrosim по площинах - температура, щільність диму, дальність видимості і т.д. Площини можна індивідуально налаштувати, задаючи діапазон значень та параметри колірної шкали.



Рис. 8. Ілюстрування поширення небезпечних факторів пожежі

4.3.3. Контури щільності людського потоку

Для наочного і зручного відображення результатів моделювання можна використовувати контури - поля різних параметрів руху, наприклад, щільність агентів. Гладка анімація забезпечує перегляд результатів у реальному часі. Контури дозволяють відображати щільність, швидкість, завантаженість шляхів та інші величини, також можливо створювати контури користувача, використовувати усереднення, пошук максимальних і мінімальних значень. Кожен контур можна індивідуально налаштовувати – діапазон значень, колірна шкала, згладжування та ін.

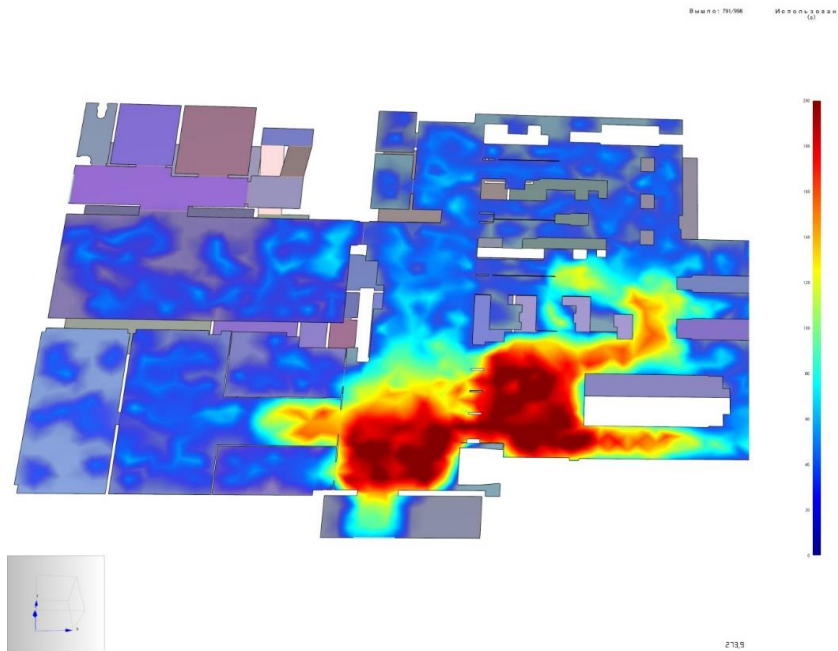


Рис. 9. Графічне зображення щільності людського потоку

4.3.4. Рух агентів до виходів

За замовчуванням кожна людина (агент) використовує комбінацію параметрів вибору шляху до виходу. Серед цих параметрів: час очікування перед кожними дверима в поточному приміщенні, час оцінки від кожної двері до виходу, і відстань, вже пройдена в приміщенні. Агенти динамічно реагують на зміну довжини черг, відкриття/закриття дверей та зміну модифікаторів швидкості в приміщенні (які можуть моделювати дим та сміття, що ускладнює рух). Користувач може налаштовувати вагу параметрів, регулюючи поведінку. Наприклад, агенту можна вказати ігнорувати довжину черг і легко рухатися до найближчого виходу.

Крім того, агентам можна ставити певні цілі (наприклад, йти у вказане місце та чекати там вказаний час), або певні виходи.

4.3.5. Сходи, ескалатори, доріжки, що рухаються, і рампи

Сходів та рампи можна створити в кілька клацань миші. Їх можна використовувати для моделювання ескалаторів і доріжок, що рухаються (похилих або горизонтальних).

4.3.6. Індивідуальні налаштування людей

Кожна людина в моделі представлена агентом з власним профілем (в якому встановлюється розмір людини та швидкість його руху) та власною поведінкою (рух до виходів, дорожніх точок та ліфтів). На основі своїх характеристик кожен агент оцінює навколишній простір та вибирає шлях до виходу. Наприклад, люди можуть уникати довгих черг або реагувати на закриття дверей.

Можна створити різноманітні профілі людей. Параметри в профілі можуть бути постійними, а також з рівномірним, нормальним або логонормальним розподілом. Наприклад, можна створити профілі, що моделюють дітей та дорослих, а потім розподілити їх серед агентів у співвідношенні 20 та 80 %. Аналогічно можна створити та розподілити безліч різноманітних поведінок. Люди можуть прямувати до різних виходів, відвідувати дорожні точки та чекати на заданий час.

Відображення тривимірних результатів можливе під час моделювання (для перегляду поточного стану), так і після завершення розрахунку. Тривимірна візуалізація дозволяє користувачеві спостерігати за рухом людей, промотувати запис уперед і назад, переглядати шляхи руху та вибирати агентів для спостереження. У файлі резюме виводиться інформація про мінімальний, максимальний та середній час руху до виходу, а також про перший і останній минулий через двері та приміщення. Більш детальна інформація наведена у файлах CSV, у тому числі про рух окремих людей.

Для розрахунків часу евакуації приймається програмного комплексу Pathfinder, який має переваги над звичним розрахунком за ДСТУ та дозволяє більш точно виконати обчислювання часу евакуації з врахуванням індивідуальних особливостей та поведінки агентів (людей).

4.4. Розрахунок часу евакуації дітей за допомогою ПК Pathfinder з навчального закладу

Проведемо розрахунок часу евакуації людей за допомогою програмного комплексу Pathfinder наприкладі дошкільного навчального закладу для дітей з порушенням слуху.

Незважаючи на той факт, що приміщення дошкільного закладу обладнанні системою керування евакууванням IV—V типу, все ж багато часу йде на реакцію людей на оповіщення про пожежу. Особи, які перебувають у будівлі, можуть на час виникнення пожежі знаходитися в стані сну, значення тривалості від початку евакуації становить – 240 с [30].

При організації процесу евакуації важливо розглядати рішення, спрямовані не тільки на покращення часу евакуації, але й на зниження щільності людських потоків. Це дасть можливість мінімізувати ризики травматизму людей і утворення перешкод у процесі руху.

В якості найбільш ефективного рішення варто розглядати поетапну евакуацію. Схема організації поетапної евакуації заснована на поділі людей, що евакуюються, і запобігання їх перетину.

Для можливості проведення розрахунків та моделювання евакуації з прийнятого дошкільного закладу слід визначити наступні вихідні дані які приймаються за наданою інформацією та вимог нормативних документів:

- ступінь вогнестійкості – I-II [31];
- режим роботи – цілодобовий;
- кількість поверхів – 2 [32];
- груповий осередок – 8 (2 групи на 1 поверсі та 6 на 2 поверсі) [32];
- висота поверху – 3,3 м [33];
- загальна кількість людей в будинку – 96 осіб дітей та 18 дорослих осіб;
- кількість сходових кліток СК1 – 3, сходовий марш – 1,35 м [32, 34];
- ширина дверей сходових кліток – 1,35 м [34];
- ширина проходів та коридорів – 1,4 м [33];
- ширина вхідних дверей дитячих осередків – 0,9 м [33];
- кількість сходів типу С3 – 6 [32];
- ширина маршів сходів типу С3 і дверей на їх площадки – 0,9 м [33, 35];
- час початку евакуації – 240 с [30];

- інтенсивність і швидкість руху людського потоку різними ділянками шляхів евакуації в залежності від щільності для групи мобільності [35]:

Таблиця 2

Інтенсивність і швидкість руху людського потоку різними ділянками шляхів евакуації в залежності від щільності для групи мобільності M1

Група МГН	Горизонтальний шлях		Сходи вниз	
	Швидкість, м/хв	Інтенсивність, м/хв	Швидкість, м/хв	Інтенсивність, м/хв
M1	100	1,0	100	1,0

– площа горизонтальної проекції людей з обмеженою мобільністю, $m^2/ос$ (рис. 10) [22].

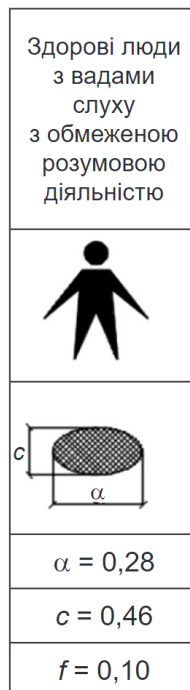


Рис. 10. Площа горизонтальної проекції людей з вадами слуху

Для розрахунку приймаємо два можливих сценарії евакуації дітей при умовній пожежі.

1. Заклад обладнаний типовою системою оповіщення СО4 (світловий, звуковий, мовленевий тип оповіщення) [20]. Пожежа виникає вночі коли діти знаходяться в стані сну та позбавлені можливості самостійно отримувати інформацію про пожежу. Вихователі які перебувають в нічний час знаходяться в сусідньому приміщенні, після отримання сигналу про пожежу від системи пожежної сигналізації (далі по тексті СПС), починають пробуджувати кожного із дітей та супроводжувати їх до евакуаційних виходів. В кожній групі знаходиться по 12 дітей.

2. Заклад обладнаний вдосконаленою системою оповіщення СО4 (світловий, звуковий, мовленевий, додатково вібраційний тип оповіщення, мерехтливі світлові доріжки) [20]. Пожежа виникає вночі коли діти знаходяться в стані сну, діти самостійно пробуджуються від вібрації пристроїв розміщених під подушками та індивідуальних браслетів які отримали сигнал від СПС, починають самостійно евакуюватися слідуючи за напрямком мерехтливих доріжок та світильників. Вихователі які перебувають в нічний час знаходяться в сусідньому приміщенні, після отримання сигналу про пожежу

від СПС слідують до дітей та супроводжувати їх до евакуаційних виходів. В кожній групі знаходиться по 12 дітей.

4.5. Перший сценарій

Діти знаходяться в стадії сну, один вихователь на дві групи на кожному поверсі.

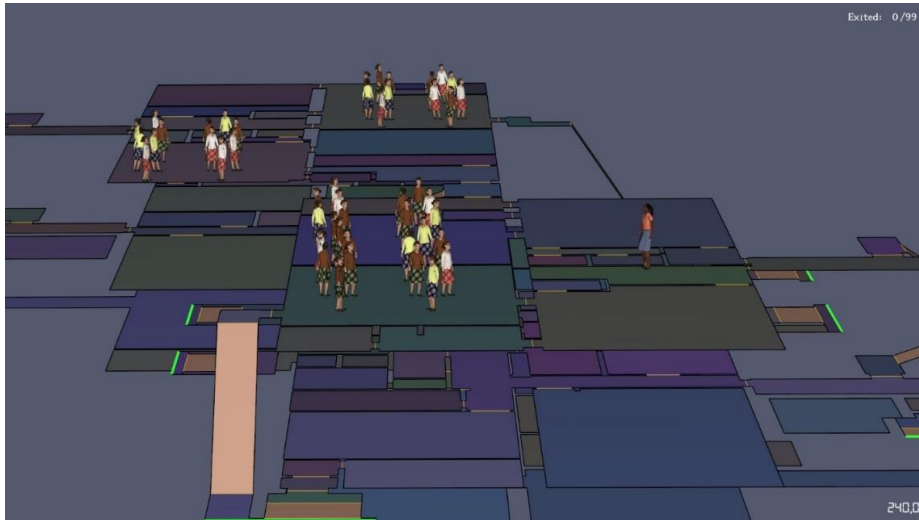


Рис. 11. Розміщення агентів на початок евакуації

Відбувається спрацювання СПС та СО, вихователі отримують сигнал про необхідність проведення евакуації. Час реагування та початку прямування для можливості пробудження дітей становить – 240 с відповідно до ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення.



Рис. 12. Початок прямування вихователів до дітей

Вихователі прибули до груп, проводиться їх пробудження. Орієнтований час на кожную дитину складає 15 с. Загальний час, витрачений на пробудження – 180 с.

Загальний час евакуації за першим сценарієм становить на 408 с.

4.6. Другий сценарій

Діти як і за першим сценарієм знаходяться в стадії сну, один вихователь на дві групи на кожному поверсі.

Відбувається спрацювання вібраційних пристроїв розміщених під подушками, індивідуальних браслетів дітей від сигналів СПС, діти починають самостійно пробуджуватися. Час пробудження та початку евакуації дітей становить 240 с відповідно до ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення.

Вихователями які прибули до груп, проводиться огляд приміщень та подальше супроводження дітей до евакуаційних виходів.

Загальний час евакуації за другим сценарієм становить на 120 с менше від часу за першим сценарієм.

Перевага СО (рис. 1) полягає:

– в більш швидкій евакуації дітей за рахунок зменшення часу витраченого на прямування та пробудження вихователями дітей, які за гіршим варіантом перебувають у стадії сну;

– отримання дітьми сигналів про пожежу;

– виключення поняття «людського» фактору.

5 ВИСНОВКИ

1. Аналізуючи вимоги чинних на території України нормативних документів слід зробити висновок, що наявні на теперішній час технічні засоби оповіщення та управління евакуацією, їх характеристики спрямовані на звичайних учнів без врахування в нашому випадку дітей з особливими освітніми потребами (порушенням слуху) як наслідок не в змозі належним чином виконати свою функцію.

2. Математична модель оцінки ефективності системи оповіщення та управління евакуацією повинна відповідати основним принципам безпечного евакуювання людей, а саме: забезпечувати можливість завершення евакуації до моменту настання гранично допустимих значень НЧП; включати параметри, що характеризують можливості безперешкодного руху людей евакуаційними шляхами; враховувати специфіку управління рухом людей, особливо дітей з особливими освітніми потребами, за допомогою звукових, світлових та мовленнєвих засобів оповіщення; коригувати параметри часу евакуації з урахуванням специфіки поведінки людей у стресових умовах та можливих змін у просторі евакуації.

3. Для підтвердження ефективності сучасної системи оповіщення проведена розрахункова частина роботи в ПК Pathfinder, яка полягала у визначенні часу евакуації на існуючому дошкільному навчальному закладі для дітей з порушенням слуху за двома сценаріями (без та з удосконаленою системою оповіщення). Ефективність полягала в більш швидкій евакуації за рахунок зменшення часу витраченого на заходи із пробудження вихователями дітей, які за гіршим варіантом перебували у стадії сну, виключення поняття «людського» фактору.

6 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають будь-яких фінансових чи нефінансових інтересів щодо матеріалів, представлених у цій статті, які слід розкривати.

Література

1. Кукузенко А.М., Рашкевич Н.В., Отрош Ю.А. Визначення стану безпеки шляхів евакуації. Матеріали Міжнародної науково-методичної конференції (Міжнародна наукова конференція ЕАС) «Безпека людини у сучасних умовах». м. Харків, НТУ «ХПІ», 1-2.12.2022 р. С. 114–116.

2. Лиходід Р.В. Рудницький В.М. Модель системи оповіщення та керування евакуацією людей під час пожежі в будинку. Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2010. Вип. 2 (24). С. 153–156.
3. Лиходід Р.В. Застосування засобів контролю перебування людей всередині будинку—перспективний напрямок вдосконалення існуючих систем оповіщення про пожежу. Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Пожежна безпека–2011». м. Харків: НУЦЗ України, 2011. 372 с.
4. Ashley, E.M. (2007). Waking effectiveness of emergency alerting devices for the hearing able, hard of hearing, and deaf populations. University of Maryland. Return to ref 12 in article.
5. Лиходід Р.В. Визначення параметрів систем оповіщення людей про пожежу за критерієм ефективності їхнього застосування. Матеріали 17 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників «Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до Європейського простору». м. Київ, 22-23.09.2015 р. С. 239–242.
6. Христич В.В., Тарасенко К.А. Проблеми реагування населення на сигнали оповіщення систем автоматичного протипожежного захисту. Матеріали міжнародної НПК молодих учених НУЦЗУ. м. Харків, НУЦЗУ, 2020. С. 150.
7. Bryan, L.J. (2002). Behavioral Response to Fire and Smoke. Chapter 3-12. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd Edition. 2. 42.
8. SFPE. (2003). Human Behavior in Fire. Engineering Guide. Society of Fire Protection Engineers. 46 p.
9. Sarwar, B. et al. (2019). An intelligent fire warning application using IoT and an adaptive neuro-fuzzy inference system. Sensors. 19(14). 3150.
10. Деревянко А.А., Кротенко О.О. Аналіз стану та тенденцій розвитку системи оповіщення про пожежу та управління евакуацією. Матеріали міжнародної НПК молодих учених НУЦЗУ. м. Харків, НУЦЗУ, 2021. С. 167.
11. Fu, L. et al. (2023). Application of the social force modelling method to evacuation dynamics involving pedestrians with disabilities. Applied mathematics and computation. 128297. URL: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2023.128297>
12. Mohd Sabri, N.A. et al. (2017). Dijkstra-ant colony optimization algorithm for shortest and safest evacuation in high rise building. 79(3). URL: <https://doi.org/10.11113/jt.v79.5912>
13. Ji, Y. et al. (2022). Real Time Building Evacuation Modeling with an Improved Cellular Automata Method and Corresponding IoT System Implementation. Buildings. 12(6). 718. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12060718>
14. Ternero, R. et al. (2023). Analysis of Pedestrian Behavior for the Optimization of Evacuation Plans in Tall Buildings: Case Study Santiago, Chile. Buildings. 13(12). 2907. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13122907>
15. Hunt, A. L. E. et al. (2020). Simulating Movement Devices Used in Hospital Evacuation. Fire Technology. 56(5) 2209–2240. URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-020-00971-5>
16. Xu, Z. et al. (2020). Virtual drill for indoor fire evacuations considering occupant physical collisions. Automation in construction. 109. 102999. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102999>
17. Комуяк, В., Кязимов, К. (2019). Variational modeling of evacuation of people from altitude buildings in the event of an emergency situation. Modern problems of modeling. 17 С. 27–35. URL: <https://doi.org/10.33842/2313-125x/2019/17/27/35>
18. Кусковець, С.Л., Москалик С.О. Шляхи вирішення проблем евакуації людей з будинків підвищеної поверховості на випадок пожежі. Bulletin National University of Water and Environmental Engineering. 2016. Т. 2. №. 74. С. 305–313.
19. Поліванов О. Сучасні проблеми гасіння пожеж у висотних будівлях. Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій», 2020. С. 55–56.
20. Хілько Ю.В., Тригуб В.В., Грицина І.М. Моделювання безпечної евакуації людей з висотних будівель при пожежі. Науковий вісник будівництва. Харків, 2017. Т. 90. № 4. С. 267–271.

21. Щолоков Е.Е., Отрош Ю.А., Майборода Р.І. Моделювання евакуації людей при пожежі за допомогою програмного забезпечення Pathfinder. Матеріали круглого столу (вебінару) «Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація». Харків: НУЦЗУ, 2022. С. 127–129.
22. Олейник О.С., Отрош Ю.А. Технічні можливості програмного забезпечення Pathfinder Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту. Матеріали міжнародної науковопрактичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2021. С. 174.
23. Олейник О.С., Отрош Ю.А., Ромін А.В. Моделювання поширення небезпечних факторів пожежі за допомогою прикладного програмного забезпечення PYROSIM. Матеріали круглого столу (вебінару) «Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація». Харків: НУЦЗУ, 2022. С. 69–70.
24. Рубан А.В., Рашкевич Н.В., Отрош В.Ю. Моделювання евакуації людей при пожежі в програмному забезпеченні PATHFINDER. Modern Technologies for Solving Actual Society's Problems. Edited by Oleksandr Nestorenko and Iryna Ostopolets. Publishing House of University of Technology, Katowice, 2022. С. 412–420.
25. Thompson, J. Wu, E. Marchant. (1997). Simulex 3.0: Modeling evacuation in multi-story buildings. Fire Safety Science. 5. 725–736. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-725
26. Майборода Р.І., Отрош Ю.А., Рашкевич Н.В., Мележик Р.С. Дослідження евакуації маломобільних груп населення з житлових висотних будинків при пожежі. Комунальне господарство міст, 2023. Том 4, вип. 178. С. 219–231. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-219-231>
27. Щолоков Е. Е., Рашкевич Н. В., Отрош Ю. А., Майборода Р. І., Тригуб В. В. Евакуація при пожежі з дитячих ігрових майданчиків з повністю закритим устаткуванням The 12th International scientific and practical conference “Innovative development of science, technology and education” (August 29-31, 2024) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2024. С. 117–122.
28. Майборода Р., Рашкевич Н., Отрош Ю., Сур'янінов В. Забезпечення безпеки евакуації маломобільних груп населення за допомогою пожежних ліфтів. Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 112–113.
29. ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека. Загальні положення». URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82138
30. ДБН В.2.2-4:2018 «Будинки і споруди. Заклади дошкільної освіти. Зі зміною № 1». URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77081
31. Underwriters Laboratories (2016b) Standards for safety: Visible signaling devices for Fire Alarm and Signaling Systems, Including accessories, UL 1638 (Ed. 5) / CAN/ULC-S526 (Ed. 4).
32. ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту». URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3200383488549193714?doc_type=2
33. ДБН В.2.2-40:2018 «Інклюзивність будівель і споруд. Основні положення». URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3192362160978134152?doc_type=2
34. Інвентаризаційна справа №534568 дошкільного навчального закладу № 582 для дітей з порушенням слуху по вул. Флоренції, 3 м. Києва.
35. ДБН В.2.2-9:2018 «Будинки і споруди. Громадські будинки та споруди. Основні положення». URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82012

References

1. Kukuzenko, A.M., Rashkevych, N.V., Otrosh, Yu.A. (2022). Vyznachennya stanu bezpeky shlyakhiv evakuatsiyi. Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-metodychnoyi konferentsiyi (Mizhnarodna naukova konferentsiya EAS) «Bezpeka lyudyny u suchasnykh umovakh». m. Kharkiv, NTU «KHPI». 114–116.
2. Lykholdid, R.V. Rudnyts'kyu, V.M. (2010). Model' systemy opovishchennya ta keruvannya evakuatsiyeyu lyudey pid chas pozhezhi v budynku. Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho universytetu Povitryanykh Syl. Kharkiv: Kharkivs'kyu universytet Povitryanykh Syl imeni Ivana Kozheduba. 2 (24). 153–156.
3. Lykholdid, R.V. (2011). Zastosuvannya zasobiv kontrolyu perebuvannya lyudey vsередyni budynku–perspektyvnyu napryamok vdoskonalennya isnuyuchykh system opovishchennya pro

- pozhezhu. Materialy KH Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Pozhezha bezpeka–2011». m. Kharkiv: NUTSZ Ukrainy. 372 s.
4. Ashley, E.M. (2007). Waking effectiveness of emergency alerting devices for the hearing able, hard of hearing, and deaf populations. University of Maryland. Return to ref 12 in article.
 5. Lykhodid, R.V. (2015). Vyznachennya parametriv system opovishchennya lyudey pro pozhezhu za kryteriyem efektyvnosti yikhnoho zastosuvannya. Materialy 17 Vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi ryatuval'nykhiv «Suchasny stan tsyvil'noho zakhyst ukrayiny: perspektyvy ta shlyakhy do Yevropeys'koho prostoru». m. Kyiv. 239–242.
 6. Khrystych, V.V., Tarasenko, K.A. (2020). Problemy reahuvannya naseleennya na syhnaly opovishchennya system avtomatychnoho protypozhezhnogo zakhystu. Materialy mizhnarodnoyi NPK molodykh uchenykh NUTSZU. m. Kharkiv, NUTSZU. 150.
 7. Bryan, L.J. (2002). Behavioral Responseto Fire and Smoke. Chapter 3-12. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd Edition. 2. 42.
 8. SFPE. (2003). Human Behavior in Fire. Engineering Guide. Society of Fire Protection Engineers. 46 p.
 9. Sarwar, B. et al. (2019). An intelligent fire warning application using IoT and an adaptive neuro-fuzzy inference system. Sensors. 19(14). 3150.
 10. Derevyanko, A.A., Krotenko O.O. (2021). Analiz stanu ta tendentsiy rozvytku systemy opovishchennya pro pozhezhu ta upravlinnya evakuatsiyeyu. Materialy mizhnarodnoyi NPK molodykh uchenykh NUTSZU. m. Kharkiv, NUTSZU. 167.
 11. Fu, L. et al. (2023). Application of the social force modelling method to evacuation dynamics involving pedestrians with disabilities. Applied mathematics and computation. 128297. URL: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2023.128297>.
 12. Mohd Sabri, N.A. et al. (2017). Dijkstra-ant colony optimization algorithm for shortest and safest evacuation in high rise building. 79(3). URL: <https://doi.org/10.11113/jt.v79.5912>
 13. Ji, Y. et al. (2022). Real Time Building Evacuation Modeling with an Improved Cellular Automata Method and Corresponding IoT System Implementation. Buildings. 12(6). 718. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12060718>.
 14. Ternero, R. et al. (2023). Analysis of Pedestrian Behavior for the Optimization of Evacuation Plans in Tall Buildings: Case Study Santiago, Chile. Buildings. 13(12). 2907. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13122907>.
 15. Hunt, A. L. E. et al. (2020). Simulating Movement Devices Used in Hospital Evacuation. Fire Technology. 56(5) 2209–2240. URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-020-00971-5>.
 16. Xu, Z. et al. (2020). Virtual drill for indoor fire evacuations considering occupant physical collisions. Automation in construction. 109. 102999. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102999>.
 17. Komyak, V., Kyazimov, K. (2019). Variantal modeling of evacuation of people from altitude buildings in the event of an emergency situation. Modern problems of modeling. 17 C. 27–35. URL: <https://doi.org/10.33842/2313-125x/2019/17/27/35>.
 18. Kuskovets', S.L., Moskalyk S.O. (2016). Shlyakhy vyrishennya problem evakuatsiyi lyudey z budynkiv pidvyshchenoyi poverkhovosti na vypadok pozhezhi. Bulletin National University of Water and Environmental Engineering. 2(74) 305–313.
 19. Polivanov, O. (2020). Suchasni problemy hasinnya pozhezh u vysotnykh budivlyakh. Materialy KHI Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Teoriya i praktyka hasinnya pozhezh ta likvidatsiyi nadzvychaynykh sytuatsiy». S. 55–56.
 20. Khil'ko, Yu.V., Tryhub, V.V., Hrytsyna, I.M. (2017). Modelyuvannya bezpechnoyi evakuatsiyi lyudey z vysotnykh budivel' pry pozhezhi. Naukovyy visnyk budivnytstva. 90(4). 267–271.
 21. Shcholokov, E.E., Otrosh, Yu.A., Mayboroda, R.I. (2022). Modelyuvannya evakuatsiyi lyudey pry pozhezhi za dopomohoyu prohramnoho zabezpechennya Pathfinder. Materialy kruhloho stolu (vebinaru) «Zapobihannya nadzvychaynym sytuatsiyam ta yikh likvidatsiya». 127–129.
 22. Oleynyk, O.S., Otrosh, Yu.A. (2021). Tekhnichni mozhlyvosti prohramnoho zabezpechennya Pathfinder Problemy ta perspektyvy zabezpechennya tsyvil'noho zakhystu. Materialy mizhnarodnoyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh. 174.
 23. Oleynyk, O.S., Otrosh, Yu.A., Romin, A.V. (2022). Modelyuvannya poshyrennya nebezpechnykh faktoriv pozhezhi za dopomohoyu prykladnoho prohramnoho zabezpechennya

- PYROSIM. Materialy kruhloho stolu (vebinaru) «Zapobihannya nadzvychaynym sytuatsiyam ta yikh likvidatsiya». 69–70.
24. Ruban, A.V., Rashkevych, N.V., Otrosh, V.Yu. (2022). Modelyuvannya evakuatsiyi lyudey pry pozhezhi v prohramnomu zabezpechenni PATHFINDER. Modern Technologies for Solving Actual Society's Problems. Edited by Oleksandr Nestorenko and Iryna Ostopolets. Publishing House of University of Technology, Katowice. 412–420.
 25. Thompson, J. Wu, E. Marchant. (1997). Simulex 3.0: Modeling evacuation in multi-story buildings. Fire Safety Science. 5. 725–736. DOI: 10.3801/iafss.fss.5-725.
 26. Mayboroda, R.I., Otrosh, Yu.A., Rashkevych, N.V., Melezhyk, R.S. (2023). Doslidzhennya evakuatsiyi malomobil'nykh hrup naselennya z zhytlovykh vysotnykh budynkiv pry pozhezhi. Komunal'ne hospodarstvo mist. 4(178). S. 219–231. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-219-231>.
 27. Shcholokov, E.E., Rashkevych, N.V., Otrosh, Yu. A., Mayboroda, R.I., Tryhub, V.V. (August 29-31, 2024). Evakuatsiya pry pozhezhi z dytyachykh ihrovykh maydanchykiv z povnistyu zakrytym ustatkovanniam The 12th International scientific and practical conference “Innovative development of science, technology and education” Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 117–122.
 28. Mayboroda, R., Rashkevych, N., Otrosh, Yu., Sur'yaninov, V. (2024). Zabezpechennya bezpeky evakuatsiyi malomobil'nykh hrup naselennya za dopomohoyu pozhezhnykh liftiv. Materialy KHIV Vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi z mizhnarodnoyu uchastyu «Nadzvychayni sytuatsiyi: bezpeka ta zakhyst». Cherkasy: CHIPB im. Heroyiv Chornobylya NUTSZ Ukrainy. 112–113.
 29. DSTU 8828:2019 «Pozhezhna bezpeka. Zahal'ni polozhennya». URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82138.
 30. DBN V.2.2-4:2018 «Budynky i sporudy. Zaklady doshkil'noyi osvity. Zi zminoyu № 1». URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77081.
 31. Underwriters Laboratories (2016b) Standards for safety: Visible signaling devices for Fire Alarm and Signaling Systems, Including accessories, UL 1638 (Ed. 5) / CAN/ULC-S526 (Ed. 4).
 32. DBN V.2.5-56:2014 «Systemy protypozhezhnoho zakhystu». URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3200383488549193714?doc_type=2.
 33. DBN V.2.2-40:2018 «Inklyuzyvnist' budivel' i sporud. Osnovni polozhennya». URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3192362160978134152?doc_type=2.
 34. Inventaryzatsiyna sprava №534568 doshkil'noho navchal'noho zakladu № 582 dlya ditey z porushennyam slukhu po vul. Florentsiyi, 3 m. Kyyeva.
 35. DBN V.2.2-9:2018 «Budynky i sporudy. Hromads'ki budynky ta sporudy. Osnovni polozhennya». URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82012

Щолоков Едуард Едуардович

Національний університет цивільного захисту України,
викладач
вул. Онопрієнка, 8, Черкаси, Україна, 18000
shcholokov_eduard@nuczu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-9923-1487

Майборода Роман Ігорович

Національний університет цивільного захисту України,
викладач
вул. Онопрієнка, 8, Черкаси, Україна, 18000
maiboroda_roman@nuczu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3461-2959

Рашкевич Ніна Владиславівна

Черкаський державний технологічний університет,
доктор філософії, старший викладач
бульвар Шевченка, 460, Черкаси, 18000
nine291085@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5124-6068



Отрош Юрій Анатолійович

Національний університет цивільного захисту України,
д.т.н., професор, т.в.о. начальника кафедри
вул. Онопрієнка, 8, Черкаси, Україна, 18000
otrosh_yurii@nuczu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-0698-2888

Балдук Павло Георгійович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
к.т.н., професор
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
baldook.p@odaba.edu.ua
ORCID: 0000-0002-9055-9005

Для посилань:

Щолоков Е. Е., Майборода Р. І., Рашкевич Н. В., Отрош Ю. А., Балдук П. Г. Дослідження ефективності системи оповіщення та евакуації дітей з порушенням слуху у закладах освіти. Механіка та математичні методи, 2025. Т. 7. № 1. С. 26–47.

For references:

E. Shcholokov, R. Maiboroda, N. Rashkevich, Yu. Otrosh, P. Balduk. (2025). Research effectiveness of the modern system of notification and evacuation of children with hearing impairments in educational institutions. Mechanics and mathematical methods. VII (1). 26–47.

УДК 666.9.022

МЕХАНОАКТИВАЦІЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ З ДОБАВКОЮ МЕЛЕНОГО ВАПНЯКУ І ЇЇ ВПЛИВ НА МІЦНІСТЬ БУДІВЕЛЬНОГО РОЗЧИНУ

Барабаш І. В.¹, Горбовий О. Л.¹

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація: В практиці виробництва мінеральних в'язучих широке розповсюдження одержали змішані цементи з використанням мінеральних добавок і, зокрема, меленого вапняку. Однією з важливих проблем в технології виробництва змішаних цементів є створення оптимальних комбінацій портландцементу з меленим вапняком, які, окрім економічної ефективності, сприяють одержанню в'язучого з покращеними властивостями. Актуальним для даного дослідження є активація змішаного в'язучого з використанням суперпластифікуючої добавки Релаксол-Супер ПК в кількості до 1 % від його маси. В роботі розглядається роздільний та сумісний вплив механоактивації, витрати змішаного в'язучого та добавки меленого вапняку у ньому, а також витрата суперпластифікатору на міцність на стиск будівельного розчину у віці 3-х та 28-и діб тверднення в нормальних умовах. Для визначення впливу та оптимізації перерахованих факторів на міцність на стиск будівельного розчину проведено 3-х факторний експеримент. Одержані поліноміальні моделі дозволили встановити пріоритетний вплив на міцність будівельного розчину витрату механоактивованого змішаного в'язучого. Зростання його вмісту в складі розчину викликає підвищення його міцності на стиск в 3-х добовому віці з 24 МПа (контроль) до 40,5 МПа, тобто майже на 70 %. Наступним за значимістю фактором впливу на міцність будівельного розчину на механоактивованому змішаному в'язучому є витрата суперпластифікатору. Зростання його вмісту від 0 до 1 % викликає зростання міцності розчину в 3-х добовому віці з 31 МПа до 41,2 МПа, тобто майже на 35 %. Що стосується впливу механоактивації на міцність будівельного розчину, то слід відзначити, що максимальний ефект від швидкісної обробки цементно-вміщуючої композиції з добавкою меленого вапняку спостерігається також у 3-х добовому віці – в цьому разі зростання міцності на стиск зразків становить не менше 60 %.

Ключові слова: механоактивація, суперпластифікатор, мелений вапняк, математичний план, будівельний розчин.

MECHANICAL ACTIVATION OF PORTLAND CEMENT WITH THE ADDITION OF GROUND LIMESTONE AND ITS EFFECT ON THE PLACE OF BIND SOLUTION

I. Barabash¹, O. Gorboviy¹

¹Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract: In practice, the production of mineral binders has become widespread with mixed cements using mineral additives and, in particular, ground limestone. One of the important problems in the technology of production of mixed cements is the creation of optimal combinations of Portland cement with ground limestone, which, in addition to economic efficiency, contribute to the production of a binder with improved properties. The activation of a mixed binder using the superplasticizing additive Relaxol-Super PC in an amount of up to 1% of its mass is relevant for this study. The work considers the separate and combined effects of mechanical activation, the consumption of mixed binder and ground limestone additives in it, as well as the consumption of SP on the compressive strength of the mortar at the age of 3 and 28 days of hardening under normal conditions. A 3-factor experiment was conducted to determine the influence and optimization of the listed factors on the compressive strength of the mortar. The obtained polynomial models allowed to establish the priority influence on the strength of the mortar of the consumption of mechanically activated mixed binder. The increase in its content in the composition of the mortar causes an increase in its compressive strength at 3-day age from 24 MPa (control) to 40.5 MPa, i.e. by almost 70%. The next most important factor influencing the strength of the mortar on mechanically



activated mixed binder is the consumption of SP. The increase in its consumption from 0 to 1% causes an increase in the strength of the mortar at 3-day age from 31 MPa to 41.2 MPa, i.e. by almost 35%. As for the influence of mechanical activation on the strength of the mortar, it should be determined that the maximum effect of high-speed processing of the cement-containing composition with the addition of ground limestone is also observed at a 3-day age - in this case, the increase in compressive strength of the samples is not less than 60%.

Keywords: mechanical activation, superplasticizer, ground limestone, mathematical plan, mortar.

1 ВСТУП

Одним із ефективних методів підвищення експлуатаційних характеристик будівельного розчину є механохімічна активація мінерального в'язучого в поєднанні з використанням суперпластифікаторів та мінеральних добавок. В практиці виробництва розчинових сумішей та будівельних розчинів на їх основі широке розповсюдження одержав портландцемент ПЦ II/A-B з добавкою вапняку від 6 до 20 %. Технологічно такий портландцемент з вапняком (в подальшому змішаний цемент) одержують як сумісним помелом портландцементного клінкеру, двоводного гіпсу та добавки вапняку так і ретельним змішуванням портландцементу з необхідною (6...20 %) кількістю меленого вапняку. Відомо, що зростання процентного вмісту вапняку (>20 %) приводить до активності змішаного цементу, що потребує зростання його витрати в будівельному розчині. Перспективним методом покращення механічних характеристик як цементного каменю так і будівельного розчину на його основі є механоактивація змішаного цементу в швидкісному змішувачі турбулентного типу. Технологічно механохімічна активація досить легко вписується в існуючі технологічні схеми виробництва розчинових сумішей, що сприяє більш повному розкриттю потенційних можливостей як змішаного цементу так і будівельного розчину на його основі.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В практиці використання розчинових сумішей та будівельних розчинів на їх основі все більше розповсюдження одержують змішані в'язучі [1-5]. В якості мінеральних добавок до цементів можливо використовувати різні неорганічні матеріали [6, 7]. Як правило, перевага надається тим матеріалам, які характеризуються високою міцністю і щільністю [8]. При введенні в портландцемент маломіцних і вологоємних матеріалів одержують змішане в'язуче з пониженою міцністю, морозостійкістю, підвищеною усадкою [9, 10]. Однією з таких мінеральних добавок до цементу є карбонат кальцію CaCO_3 (вапняк). Внаслідок великих розвіданих об'ємів вапняку використання його в якості мінеральної добавки до цементу безперервно зростає і, на даний час, об'єм таких цементів перевищує об'єм портландцементів типу ПЦ I. Поряд з позитивним екологічним аспектом застосування вапняку забезпечує одержання будівельних розчинів та бетонів зниженої енергоємності [11]. Значно підсилює позитивний ефект від введення в портландцемент меленого вапняку механохімічна активація в'язучого в турбулентних потоках [12, 13]. Використання швидкісного гідродинамічного змішування для активації цементу в поєднанні з оптимальною за кількістю добавкою меленого вапняку та суперпластифікатору забезпечують, поряд з пластифікацією, прискорення процесів гідратації цементу, що дозволить відмовитись від використання енергозатратних швидкотверднучих цементів [14].

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета запропонованої роботи полягає у визначенні роздільного та сумісного впливу механоактивації, витраті змішаного в'язучого та добавки меленого вапняку у ньому, а також витрати суперпластифікуючої добавки Релаксол-Супер ПК на міцність на стиск будівельного розчину у віці 3-х та 28-и діб тверднення в н.у. Механохімічна активація модифікованої водної композиції тільки з портландцементом, а також суміші в'язучого з меленим вапняком та суперпластифікатором здійснювалася в швидкісному млині ($n=1800$ об/хв) протягом 180 сек. Для контролю використовувалася суміш аналогічного складу, але яка механохімічній активації не підлягала. Для визначення впливу та

оптимізації перерахованих факторів на міцність на стиск будівельного розчину був проведений 3-х факторний експеримент, де в якості незалежних були прийняті наступні фактори: а) витрата змішаного в'язучого у складі будівельного розчину; б) витрата меленого вапняку у складі змішаного в'язучого; в) витрата суперпластифікуючої добавки Релаксол-Супер ПК (в подальшому СП).

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості в'язучого в експериментальних дослідженнях використовувався портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-500, який відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010 "Цементи загальнобудівного призначення. Технічні умови". Змішане в'язуче одержували шляхом ретельного змішування віддозованої кількості меленого вапняку (20 і 40 % по масі) та портландцементу. В якості заповнювача для будівельного розчину використовувався кварцовий пісок з $M_{кр} = 2,2$. Досліджувалася міцність на стиск зразків балачок – розміром $4 \times 4 \times 16$ см, які були виготовлені із розчинової суміші як на механоактивованому змішаному в'язучому так і на в'язучому аналогічного складу, але яке механохімічній активації не підлягало. Експериментальні дослідження проводилися з використанням Д-оптимального математичного плану. В експерименті варіювалися наступні фактори:

X_1 – відношення маси змішаного в'язучого до немеленого кварцового піску – 1:3; 1:2; 1:1;

X_2 – витрата меленого вапняку у змішаному в'язучому – (20 ± 20) %;

X_3 – витрата СП (від маси змішаного в'язучого) – $(0,5 \pm 0,5)$ %.

Витрата води замішування для кожної строчки математичного плану приймалася з розрахунку одержання діаметру розпливу суміші на струшувальному столику у діапазоні 140 ± 5 мм. Заданий діаметр розпливу розчинової суміші приймався однаковим для двох порівнювальних технологій – з використанням механоактивації змішаного в'язучого і технології, в якій механоактивація в'язучого не передбачалася (контроль). План експерименту і склади досліджених будівельних розчинів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Математичний план експерименту і склади будівельних розчинів

№	Рівні незалежних факторів			ЗВ:П	Вміст сухих компонентів розчинової суміші на один заміс			
					Склад змішаного в'язучого		Кварцовий пісок, г	Релаксол-Супер ПК, г
	X_1	X_2	X_3		Портландцемент, г	Мелений вапняк, г		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-	-	-	1:3	500	-	1500	0,0
2	-	+	-	1:3	300	200	1500	0,0
3	0	0	-	1:2	534	133	1333	0,0
4	+	-	-	1:1	1000	-	1000	0,0
5	+	+	-	1:1	600	400	1000	0,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	-	0	0	1:3	400	100	1500	2,5
7	0	-	0	1:2	667	-	1333	3,4
8	0	0	0	1:2	534	133	1333	3,4
9	0	+	0	1:2	400	267	1333	3,4
10	+	0	0	1:1	800	200	1000	5,0
11	-	-	+	1:3	500	-	1500	5,0
12	-	+	+	1:3	300	200	1500	5,0
13	0	0	+	1:2	534	133	1333	6,7
14	+	-	+	1:1	1000	-	1000	10,0
15	+	+	+	1:1	600	400	1000	10,0

Примітка: 1:3; 1:2; 1:1 – співвідношення між витратою змішаного в'язучого (г) і кварцового піску (г)

Статистична обробка експериментальних даних дозволила одержати поліноміальні моделі (1-4) міцності будівельного розчину на стиск в 3-х та 28-и добовому віці в залежності від досліджуваних факторів:

$$R_{cm}^{m.3} = 23,6 + 6,6X_1 + 2,5X_1^2 - 0,9X_1X_2 + 0,7X_1X_3 - 3,0X_2 - 0,9X_2^2 + 0,6X_2X_3 + 3,6X_3 - 0,2X_3^2; \quad (1)$$

$$R_{cm}^{m.28} = 39,0 + 10,7X_1 + 4,4X_1^2 - 1,3X_1X_2 + 0,8X_1X_3 - 4,9X_2 - 1,7X_2^2 - 0,7X_2X_3 + 5,7X_3; \quad (2)$$

$$R_{cm}^{k.3} = 13,3 + 3,6X_1 + 1,3X_1^2 - 0,5X_1X_2 + 0,2X_1X_3 - 1,7X_2 - 0,4X_2^2 + 1,8X_3; \quad (3)$$

$$R_{cm}^{k.28} = 29,8 + 8,2X_1 + 3,3X_1^2 - 0,9X_1X_2 + 0,6X_1X_3 - 3,9X_2 - 1,2X_2^2 + 4,5X_3. \quad (4)$$

де $R_{cm}^{m.3}$ (МПа), $R_{cm}^{m.28}$ (МПа) – міцність будівельного розчину на механоактивованому змішаному портландцементі у 3-х та 28-и добовому віці;

$R_{cm}^{к.3}$ (МПа), $R_{cm}^{к.28}$ (МПа) – міцність будівельного розчину на змішаному портландцементі, який механоактивації не підлягав (контроль), у 3-х та 28-и добовому віці.

Аналізуючи математичні моделі (1-4) слід відмітити, що максимальний вплив на міцність будівельного розчину як у 3-х добовому так і у 28-и добовому віці надає вміст змішаного в'язучого (X_1) у розчиновій будівельній суміші. Підтвердженням визначального впливу вмісту змішаного в'язучого на міцність будівельного розчину як на механоактивованому так і на в'язучому, яке не підлягало механоактивації, є однофакторні графічні залежності, які наведені на рис. 1.)

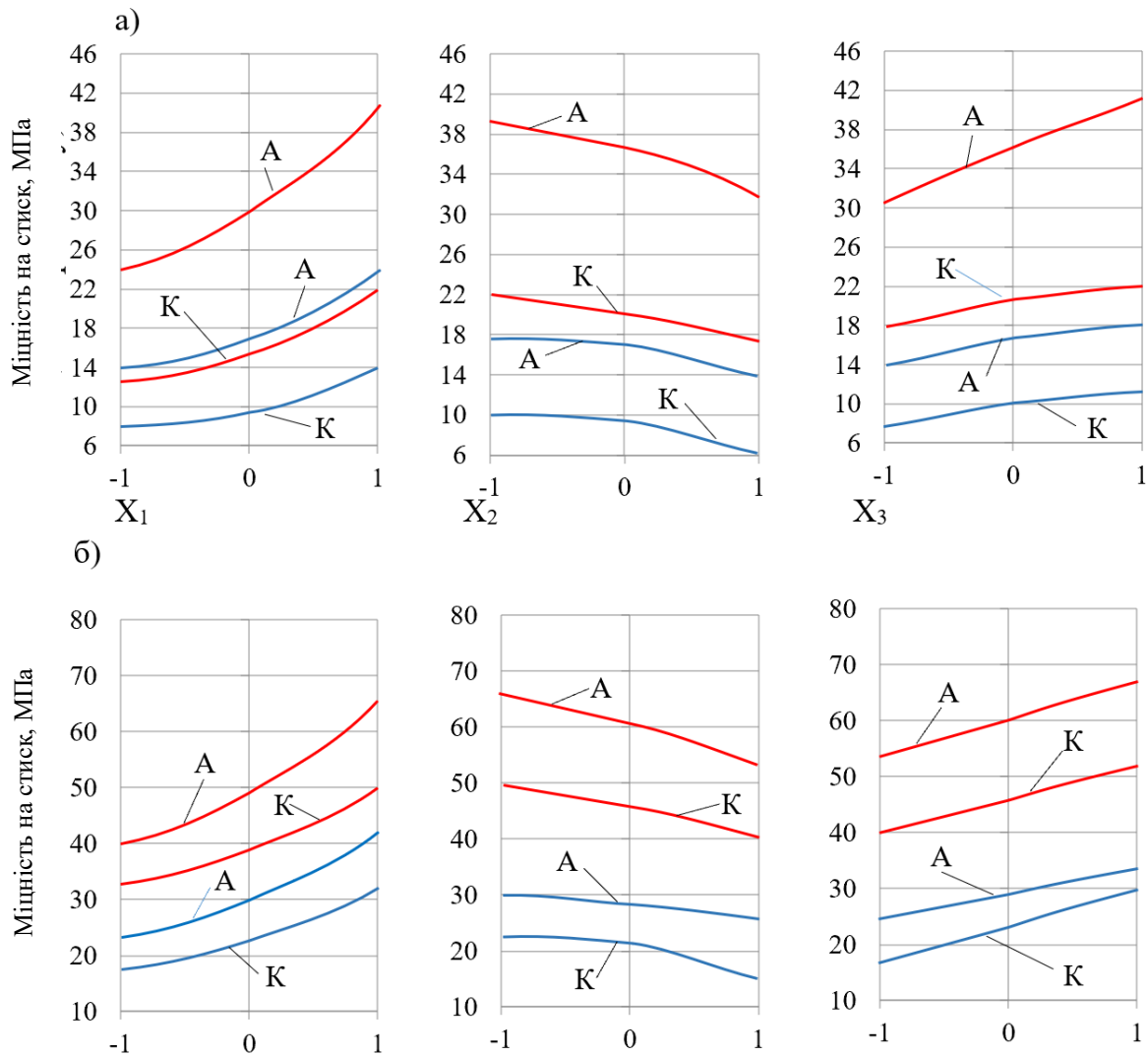


Рис. 1. Вплив рецептурних факторів на міцність будівельного розчину на стиск в зоні максимуму (—) та мінімуму (—):

- а – міцність будівельного розчину в 3-х добовому віці;
- б – міцність будівельного розчину в 28-и добовому віці;
- К – контроль (міцність зразків на в'язучому, яке механоактивації не підлягало);
- А – міцність зразків на механоактивованому в'язучому

Аналізуючи експериментальні дані слід визначити, що зростання вмісту механоактивованого змішаного в'язучого у складі розчинової суміші викликає підвищення міцності на стиск будівельного розчину в 3-х добовому віці з 24 МПа до 40,5 МПа, тобто майже на 70 %. В 28-и добовому віці вплив вмісту активованого

змішаного в'язучого на міцність будівельного розчину дещо знижується і не перевищує 62,5 %. Наступним за значимістю фактором впливу на міцність будівельного розчину на механоактивованому в'язучому є витрата СП. Слід відмітити, що зростання вмісту СП від 0 до 1 % маси змішаного в'язучого приведе до підвищення міцності цементно-піщаних зразків в 3-х добовому віці з 31 МПа до 41,2 МПа тобто майже на 33 %, а в 28-и добовому віці на 29 % - з 52 до 67 МПа. Що стосується впливу вмісту меленого вапняку на міцність на стиск будівельного розчину в зоні максимума, то експериментально встановлено, що в 3-х добовому віці зростання витрати вапняку у змішаному в'язучому від 0 до 40 % викликає зниження його міцності з 40,5 МПа до 32 МПа, тобто майже на 27 %. Для будівельного розчину на механоактивованому в'язучому у 28-и добовому віці введення до складу змішаного в'язучого 40 % меленого вапняку приведе до зниження міцності зразків (в порівнянні з використанням портландцементу без добавки меленого вапняку) на 23 % - з 65,2 до 53 МПа.

Що стосується впливу механоактивації на міцність будівельного розчину то слід визначити, що максимальний ефект від швидкісної обробки цементно-вміщуючої композиції з добавкою меленого вапняку спостерігається в 3-х добовому віці - в цьому разі зростання міцності на стиск зразків становить не менше 60 %. В 28-и добовому віці ефект від механоактивації дещо знижується і, в порівнянні з контролем, не перевищує 30...32 %.

Підтвердженням позитивного впливу механоактивації є графічні залежності, в яких віддзеркалюється вплив витрати змішаного в'язучого на міцність на стиск будівельного розчину в 28-и добовому віці, рис 2.

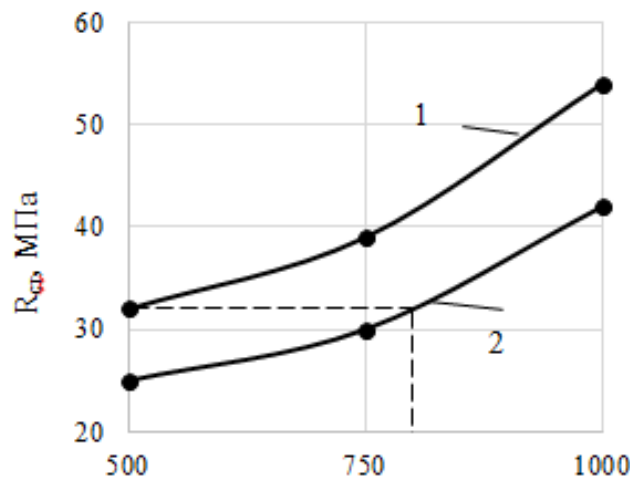


Рис.2. Вплив витрати змішаного в'язучого (кг/м³) на міцність будівельного розчину на стиск в 28-добовому віці:

- 1 - механоактивоване змішане в'язуче;
2- контроль (змішане в'язуче, яке механоактивації не підлягало)

Зафіксувавши фактори X_2 і X_3 (витрати меленого вапняку та СП) на нульових рівнях отримаємо математичні залежності, які мають вигляд:

$$R_{cm}^{m,28} (\text{МПа}) = 39,0 + 10,7 X_1 + 4,4 X_1^2, \quad (5)$$

$$R_{cm}^{k,28} (\text{МПа}) = 29,8 + 8,2 X_1 + 3,3 X_1^2. \quad (6)$$

Одержані графічні залежності наглядно підтверджують вплив механохімічної активації на зростання міцності будівельного розчину. Так, міцність будівельного розчину на механоактивованому змішаному в'язучому (32 МПа) забезпечується при витраті його в кількості 500 кг/м³. Для отримання аналогічної міцності будівельного

розчину на змішаному в'язучому, яке механоактивації на підлягало, необхідно витратити його в кількості 790 кг/м^3 , що майже на 60 % більше.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розглянуті у статті результати дослідів пов'язані з визначенням впливу рецептурно-технологічних факторів, а саме: а) механохімічної активації змішаного в'язучого (суміш портландцементу з добавкою меленого вапняку; б) витрати змішаного в'язучого; в) витрати СП на міцність на стиск будівельного розчину. Витрата змішаного в'язучого приймалося в діапазоні від 500 до 1000 кг/м^3 . Статистична обробка експериментальних даних та одержані поліноміальні моделі як на механоактивованому в'язучому, так і на в'язучому, яке не підлягало механоактивації, дозволили зробити висновок про пріоритетний вплив на міцність будівельного розчину як в 3-х добовому так і в 28-и добовому віці витрату змішаного в'язучого. Експериментальні дані свідчать про те, що зростання вмісту в'язучого в складі розчинової суміші від 500 до 1000 кг/м^3 викликає підвищення міцності на стиск будівельного розчину в 3-х добовому віці з 24 до $40,5$ МПа, а 28-и добовому віці - з 33 до 54 МПа, тобто майже на 66 %. Наступним за значимістю фактором впливу на міцність будівельного розчину на механоактивованому в'язучому є витрата СП. Зростання його вмісту (від 0 до 1 % маси змішаного в'язучого) приводить до підвищення міцності цементно-піщаних зразків в 3-х добовому віці з 31 МПа до $41,2$ МПа, тобто майже на 33 %. Що стосується впливу меленого вапняку на міцність на стиск будівельного розчину, то слід визначити, що механоактивація в значній мірі нівелює спад його міцності, що дозволяє вводити до складу змішаного в'язучого до 40 % меленого вапняку без істотного зниження міцності розчину на стиск в 28-и добовому віці.

6 ВИСНОВОК

Механохімічна активація портландцементу з добавкою меленого вапняку (до 40 %) в присутності СП є ефективним технологічним впливом в процесі виробництва будівельного розчину.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають будь-яких фінансових чи нефінансових інтересів щодо матеріалів, представлених у цій статті, які слід розкривати.

Література

1. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Марчук В.В. та ін. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням технологічної сировини /Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, В.В. Марчук, Ю.Стасюк, М.М. Скрипник /монографія. Рівне: НУВГП.2017.424с.
2. Рунова Р.Ф., Носовський Ю.Л. Технологія модифікованих будівельних розчинів. К: КНУБА, 2007.256с.
3. Вировий В.М. Композиційні будівельні матеріали та конструкції. Структура, самоорганізація, властивості/В.М. Вировий, В.С. Дорофєєв, В.Г. Суханов//Одеса: Вид-во «ТЕС», 2010. 176с.
4. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Гарніцький Ю.В. Модифіковані золотмісні сухі будівельні суміші для мурувальних та клейових розчинів. НУВГП. Рівне. 2013. 325с.
5. Рунова Р.Ф. Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх впровадження в будівництво/ Р.Ф. Рунова, В.І. Гоц, М.А. Саницький та ін./ К: УВПК «Екс Об», 2008. 360с.
6. Русин Б.Г. Високофункціональні бетони на основі портландцементів, модифікованих

- ультрадисперсними мінеральними добавками: авторец. дис. на здобуття наук. ст. к.т.н. за спец. 05.23.05/ НУ «Львівська політехніка». Львів. 2014. 21с.
7. Соболев Х.С. Концентрація застосування модифікованих композиційних цементів у будівельному виробництві// Вісник НУ «Львівська політехніка»: Теорія і практика будівництва. 2024. №520. С.179-182.
 8. Шнайдер М., Беунер З. Экономические и технические преимущества композиционных цементов. Цемент и его применение. 2016. С. 36-39
 9. Троян В.В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Київ. Аспект-Поліграф. 2010.228с.
 10. Giergiczny Z., Mololepszy J., Szwabowski J., Słwinski J. Cementy z dobrimi mineralnymi Wtechnologiei betonow nowej generacji. Gorazdze cement. Opole? 2002. 191 s.
 11. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев'юк У. М. Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементи та бетони. Монографія. Львів: ТОВ Простір-М, 2021, 206с.
 12. Barabash I.V., Davidchuk V.G., Streltsov K.A. Mechanochemical activation of portland cement and its influence on the thermomechanical characteristics of cement- water compositions and solutions based on them// Modern construction and architecture, no 8, page 43-49.
 13. Вировий В. Н. та ін. Механоактивація в технології бетонів. ОДАБА. 2014.148 с.

References

1. Dvorkin L.I. Zhytkovskyi V.V., Marchuk V.V. та in.. Efektyvni tekhnologii betoniv ta rozchyniv iz zastosuvanniam tekhnolog ennoi syrovyny /L.I Dvorkin, V.V. Zhytkovskyi, V.V. Marchuk, Yu.Stasiuk, M.M. Skrypnyk /monohrafiia. Rivne: NUVHP.2017.424s.
2. Runova R.F., Nosovskyi Yu.L. Tekhnologiiia modyfikovanykh budivelnykh rozchyniv. K: KNUBA, 2007.256s.
3. Vyrovyi V.M. Kompozytsiini budivelni materialy ta konstruksii. Struktura, samoorhanizatsiia, vlastyvoli/V.M. Vyrovyi, V.S. Dorofieiev, V.H. Sukhanov//Odesa: Vyd-vo «TES», 2010. 176s.
4. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L., Harnitskyi Yu.V. Modyfikovani zolovmisni sukhi budivelni sumishi dlia muruvalnykh ta kleiovykh rozchyniv. NUVHP. Rivne. 2013. 325s.
5. Runova R.F. Konstruksiiini materialy novoho pokolinnia ta tekhnologii yikh vprovadzhennia v budivnytstvo/ R.F. Runova, V.I. Hots, M.A. Sanytskyi та in./ K: UVPK «Eks Ob», 2008. 360s.
6. Rusyn B.H. Vysokofunktsionalni betony na osnovi portlandtsementiv, modyfikovanykh ultradispersnymy mineralnymy dobavkamy: avtorets. dys. na zdobuttia nauk. st. k.t.n. za spets. 05.23.05/ NU «Lvivska politekhnika». Lviv. 2014. 21s.
7. Sobol Kh.S. Kонтсентратиia zastosuvannia modyfikovanykh kompozytsiinykh tsementiv u budivelnomu vyrobnytstvi// Visnyk NU «Lvivska politekhnika»: Teoriia i praktyka budivnytstva. 2024. №520. S.179-182.
8. Shnaider M., Beuner Z. Экономыcheskye y tekhnicheskye preymushchestva kompozytsyonnykh tsementov. Tsement y eho prymerenye. 2016. S. 36-39
9. Troian V.V. Dobavky dlia betoniv i budivelnykh rozchyniv. Kyiv. Aspekt-Polihrاف. 2010.228s.
10. Giergiczny Z., Mololepszy J., Szwabowski J., Słwinski J. Cementy z dobrimi mineralnymi Wtechnologiei betonow nowej generacji. Gorazdze cement. Opole? 2002. 191 s.
11. Sanytskyi M.A., Kroptyvnytska T.P., Hev' yuk U. M. Shvydkotverdnuchi klinker-efektyvni tsementy ta betony. Monohrafiia. Lviv: TOV Prostir-M, 2021, 206s.
12. Barabash I.V., Davidchuk V.G., Streltsov K.A. Mechanochemical activation of portland cement and its influence on the thermomechanical characteristics of cement- water compositions and solutions based on them// Modern construction and architecture, no 8, page 43-49.
13. Vyrovyi V. N. та in. Mekhanoaktyvatsiia v tekhnologii betoniv. ODABA. 2014.148 с.

Барабаш Іван Васильович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
д.т.н., професор,
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
dekansti@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-0241-4728



Горбовий Олег Любомирович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
аспірант,
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
gorbovoy@gmail.com
ORCID: 0009-0001-5425-4327

Для посилань:

Барабаш І. В., Горбовий О. Л. Механоактивація портландцементу з добавкою меленого вапняку і її вплив на міцність будівельного розчину. Механіка та математичні методи, 2025. Т. VII. № 1. С. 48–57.

For references:

I. Barabash, O. Gorboviy (2025). Mechanical activation of portland cement with the addition of ground limestone and its effect on the place of bind solution. Mechanics and Mathematical Methods. VII (1). 48–57.

UDC 624.154.3

ANALYSIS OF THE SUSTAINABILITY OF A SPATIAL BUILDING

V. Fomin¹, I. Fomina¹

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

Abstract: Concrete columns are important elements of building structures that provide stability and load-bearing capacity to buildings. However, their durability can be significantly reduced when exposed to aggressive environments such as chemicals, moisture, salt, acid rain, etc. Asymmetric exposure to such environments can lead to uneven concrete failure, which affects the spatial stability of the column.

The main factors affecting column stability: 1. Aggressive environment: chemical corrosion of concrete and reinforcement, uneven impact on different parts of the column (for example, one side of the column is more exposed to moisture or chemicals), cracking and loss of concrete strength. 2. Mechanical loads: asymmetrical loading of the column due to external factors (wind, earthquakes, uneven weight distribution of the structure), Additional stresses in concrete and reinforcement. 3. Design features: rigid clamping of the column (clamping) limits its ability to deform, which can lead to stress concentration, the presence of reinforcement and its condition (corrosion of reinforcement significantly reduces the bearing capacity of the column).

Consequences of asymmetric impact: uneven deformation: One side of the column may deteriorate faster, resulting in a tilted or distorted structure, reduced bearing capacity: loss of concrete and reinforcement strength reduces the column's ability to support loads, risk of failure: uneven exposure can lead to sudden collapse of the column, which can endanger the entire structure.

Measures to improve stability: 1. Protection against aggressive environment: use of chemical-resistant materials (e.g. special concrete grades), application of protective coatings on the column surface (waterproofing, anti-corrosion coatings). 2. Design solutions: increasing the thickness of the protective layer of concrete around the reinforcement, use of corrosion-resistant composite reinforcement. 3. Monitoring and maintenance: regular inspection of the column for cracks, corrosion and other defects, carry out repair work to eliminate damage. 4. Calculations and design: consideration of the impact of aggressive environment at the design stage, use of software to model column behaviour under asymmetric loads.

The spatial stability of a rigidly clamped concrete column under asymmetric aggressive environment depends on many factors, including the quality of materials, design solutions and operating conditions. To ensure the durability and safety of the structure, it is necessary to take into account all these aspects at the design stage and regularly carry out preventive measures.

Keywords: reinforced concrete, corrosion, stability, boundary element method, finite element method, frame, spatial stability, buildings and structures.

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ПРОСТОРОВОЇ БУДІВЛІ

Фомін В. М.¹, Фоміна І. П.¹

¹*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

Анотація: Бетонні колони є важливими елементами будівельних конструкцій, які забезпечують стійкість та несучу здатність будівель. Однак їхня довговічність може бути значно знижена під впливом агресивних середовищ, таких як хімічні речовини, волога, сіль, кислотні дощі тощо. Несиметричний вплив таких середовищ може призводити до нерівномірного руйнування бетону, що впливає на просторову стійкість колони.

Основні фактори, що впливають на стійкість колони: 1. Агресивне середовище: Хімічна корозія бетону та арматури, нерівномірний вплив на різні частини колони (наприклад, одна сторона колони більше піддається впливу вологи або хімічних речовин), утворення тріщин та

втрата міцності бетону. 2. Механічні навантаження: несиметричне навантаження колони через зовнішні фактори (вітер, землетруси, нерівномірний розподіл ваги конструкції), виникнення додаткових напружень у бетоні та арматурі. 3. Конструктивні особливості: жорстке затискання колони (защемлення) обмежує її можливість до деформацій, що може призводити до концентрації напружень, наявність арматури та її стан (корозія арматури значно знижує несучу здатність колони).

Наслідки несиметричного впливу: нерівномірна деформація: одна сторона колони може руйнуватися швидше, що призводить до нахилу або викривлення конструкції, зниження несучої здатності: Втрата міцності бетону та арматури зменшує здатність колони витримувати навантаження, ризик руйнування: Нерівномірний вплив може призвести до раптового руйнування колони, що становить загрозу для всієї конструкції.

Заходи для підвищення стійкості: захист від агресивного середовища: використання стійких до хімічних впливів матеріалів (наприклад, спеціальні марки бетону), нанесення захисних покриттів на поверхню колони (гідроізоляція, антикорозійні покриття). 2. Конструктивні рішення: збільшення товщини захисного шару бетону навколо арматури, використання композитної арматури, стійкої до корозії. 3. Моніторинг та обслуговування: регулярний огляд колони на наявність тріщин, слідів корозії та інших дефектів, проведення ремонтних робіт для усунення пошкоджень. 4. Розрахунки та проектування: врахування впливу агресивного середовища на етапі проектування, використання програмного забезпечення для моделювання поведінки колони при несиметричних навантаженнях.

Просторова стійкість жорстко затиснутої бетонної колони за несиметричного впливу агресивного середовища залежить від багатьох факторів, включаючи якість матеріалів, конструктивні рішення та умови експлуатації. Для забезпечення довговічності та безпеки конструкції необхідно враховувати всі ці аспекти на етапі проектування та регулярно проводити профілактичні заходи.

Ключові слова: залізобетон, корозія, стійкість, метод граничних елементів, метод кінцевих елементів, рама, просторова стійкість, будівлі та споруди.

1 INTRODUCTION

In the process of operation, buildings and structures are affected by the external environment for a long time and, as an example, corrosion. This greatly complicates the durability and functionality of objects.

2 ANALYSIS LITERARY DATA AND PROBLEMS STATEMENT

Spatial stability of concrete columns is an important problem in structural mechanics, especially when exposed to aggressive media. Unsymmetrical impact of such media can lead to material degradation, change of mechanical properties and, as a consequence, to the loss of structural stability. In this review, the main approaches to analysing the stability of rigidly clamped concrete columns under asymmetric effects of aggressive media are discussed.

The foundations of the theory of structural stability were laid in the works of Euler, who first considered the problem of longitudinal bending of a rod. For concrete columns, the works devoted to the consideration of nonlinear material properties and geometrical nonlinearity are of great importance.

The rigid pinching of the column in the foundation or slab significantly affects its stability. The works [1, 2] consider the methods of taking into account rigid pinching in stability calculations.

Aggressive media (acids, alkalis, salts) can cause corrosion of concrete and reinforcement, which leads to a decrease in the strength and stiffness of the structure. The main mechanisms of concrete degradation under the influence of different media are described in [3, 4].

Non-uniform exposure to aggressive media can be caused by non-uniform distribution of the medium around the column (e.g., on one side). This leads to non-uniform degradation of the material and, as a consequence, to the occurrence of additional stresses and deformations [5].

Modern methods of stability analysis include the use of finite element analysis (FEA), which allows taking into account nonlinear material properties and geometrical nonlinearity. In [6, 7], examples of using FEA to analyse the stability of concrete columns are presented.

Experimental studies play an important role in the validation of numerical models. In [8, 9], experiments to determine the stability of concrete columns under the influence of aggressive media are described.

In order to account for the asymmetric effects of aggressive media, it is necessary to model the material degradation process. In [10, 11], models that take into account non-uniform distribution of degradation along the column cross-section are proposed.

Non-symmetrical degradation leads to changes in the distribution of stresses and deformations, which can significantly reduce the column stability. The works [12] consider methods of accounting for this effect in stability calculations.

Analysis of the literature shows that the spatial stability of rigidly clamped concrete columns under asymmetric effects of aggressive media is a complex problem requiring the consideration of many factors. Modern methods of analysis, including numerical and experimental approaches, make it possible to obtain more accurate estimates of the stability of such structures. However, further research is needed to develop more advanced models that take into account all aspects of the effects of aggressive media on concrete structures.

3 PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE RESEARCH

In the present paper, a more complex case is considered when two of the adjacent side faces are corroded, with the onset of corrosion processes in the faces not coinciding in time.

4 RESEARCH RESULTS

The column is a corner in the structure and the diagonal partition starts from it (Fig. 1). We will call these two faces internal.

We denote the inner face perpendicular to the axis by number 1, and the face perpendicular to the axis by number 2.

When investigating the stability of the column, we will follow the algorithm described earlier.

In this case, we will define the values of critical forces as

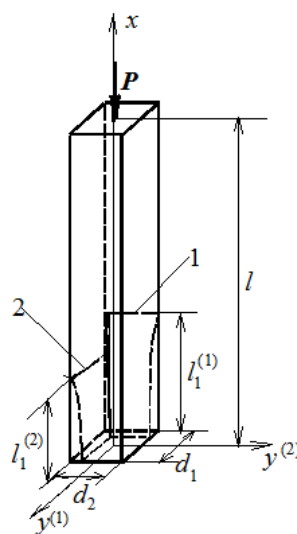


Fig. 1. Corner column

for loss of stability in the plane $xy^{(1)}$, and in the plane $xy^{(2)}$. It is clear that the loss of stability will occur at the lower of them.

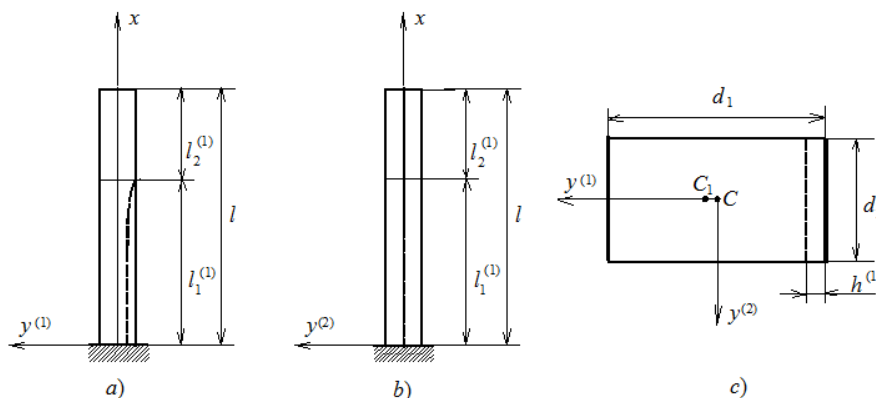


Fig. 2. Longitudinal sections of the column

Let the beginning of the corrosion process in face 1 corresponds to $t = 0$, and at the edge of 2 $t = t_0^{(2)} > 0$.

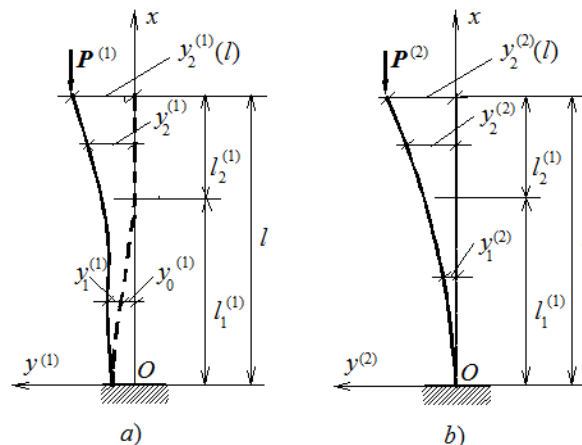


Fig.3. Dashed line column in the plane

Let's consider the stability of the column on the time interval $0 \leq t < t_0^{(2)}$. Longitudinal sections of the column by planes $xy^{(1)}$ и $xy^{(2)}$ are presented in Fig. 2a) и 2b). The height and depth of the corroded layer are determined by the following formulas

$$l_1^{(1)}(t) = v_0 t, \quad h^{(1)}(x, t) = h_0 e^{-\beta v_0 / [l_1^{(1)}(t) - x]}. \quad (1)$$

Let's call the centreline geometric location of the centres of gravity of the uncorroded cross-sections of the column (in Fig. 2c) the centre of gravity of the uncorroded part of the cross-section is designated C1). In Fig. 3a) the dashed line shows the centreline of the column in the plane $xy^{(1)}$. In the plane $xy^{(2)}$, it coincides with the column axis. Following the algorithm outlined earlier, we construct the critical force equation:

$$F_1^{(i)}(P^{(i)}, t) \cos k_2^{(i)} + F_2^{(i)}(P^{(i)}, t) \sin k_2^{(i)} - 1 = 0 \quad (i = 1, 2). \quad (2)$$

Here index i corresponds to the loss of stability in the plan:

$$xy^{(i)} \quad (i = 1, 2), \quad k_2^{(i)} = l \sqrt{P^{(i)} / E_0 J_2^{(i)}}, \quad J_2^{(1)} = d_2 d_1^3 / 12, \quad J_2^{(2)} = d_1 d_2^3 / 12,$$

$$F_1^{(i)}(P^{(i)}, t) = [Z_1^{(i)}(\lambda_1^{(1)}(t), t) - 1] k_2^{(i)} \cos k_2^{(i)} \lambda_1^{(1)}(t) - Z_1^{(i)'}(\lambda_1^{(1)}(t), t) \sin k_2^{(i)} \lambda_1^{(1)}(t),$$

$$F_2^{(i)}(P^{(i)}, t) = [Z_1^{(i)}(\lambda_1^{(1)}(t), t) - 1] k_2^{(i)} \sin k_2^{(i)} \lambda_1^{(1)}(t) + Z_1^{(i)'}(\lambda_1^{(1)}(t), t) \cos k_2^{(i)} \lambda_1^{(1)}(t),$$

$$Z_1^{(i)}(\xi, t) = \sum_{k=1}^{\infty} Z_{1,k}^{(i)}(\xi, t) (\varepsilon^{(i)})^k, \quad Z_{1,k}^{(i)}(\xi, t) = \sum_{j=0}^{\infty} f_j^{(i,k)} \xi^j, \quad \xi = \frac{x}{l}, \quad \varepsilon^{(i)} = P^{(i)} l^2 / E_0,$$

$$\lambda_1^{(1)}(t) = l_1^{(1)}(t) / l, \quad f_j^{(i,k)} - \text{coefficients, which are defined } f_j^{(i)}(t), \quad f^{(1)}(\xi, t) = \frac{12}{d_2 [d_1 - h^{(1)}(\xi, t)]^3} \text{ and } f^{(2)}(\xi, t) = \frac{12}{[d_1 - h^{(1)}(\xi, t)] d_2^3} \text{ in } f^{(i)}(\xi, t) = \sum_{j=0}^{\infty} f_j^{(i)}(t) \xi^j \quad (i = 1, 2).$$

To determine the critical forces, we use equation (2), in which we should assume:

$$f^{(1)}(\xi, t) = 12 / [d_2 - h^{(2)}(\xi, t)] [d_1 - h^{(1)}(\xi, t)]^3,$$
$$f^{(2)}(\xi, t) = 12 / [d_1 - h^{(1)}(\xi, t)] [d_2 - h^{(2)}(\xi, t)]^3.$$

The other designations remain as above.

5 DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

After all the calculations have been carried out, it can be said with certainty that the use of this method can show how reliably the structure is operated and it is quite easy to calculate its long-term use under the action of any aggressive environment.

6 CONCLUSIONS

The method for investigation of nonuniplanar stability of concrete columns with taking into account nonsymmetrical aggressive environmental impact is offered, what allows their on-time strengthening to secure the reliability of constructions.

7 ETHICAL DECLARATIONS

The authors have no relevant financial or non-financial interests to report.

References

1. Fomina I.P. Ustoichevost zeleobetonoy P-obraznoy rami pod deystviem agressivnoy sredy, Visnik ODABA, vol. 57, pp. 265-273, Odessa, 2014.
2. Bliarskiy Z.Y. "Zalibetoni konstrukcii v agresivnomu seredovischi za dii navantazeniya tai h pidsileniya", Lviv, 2011.
3. Bliarskiy Z.Y. Naprujeno-deformovany stan zalibetonnih konstruktsiy v agresivnomu seredovischi pri dii Lvivska politehnika". – L., 2005. – 348 ark.: ris., tabl. – Bibliogr.: ark. 298-338.
4. Doslidjenya naprujeno-deformovanogo stanu zalibetonnih konstruktsiy zagliblenih budivel z urahuvanyam ih vzaemodii z gruntovim masivov. T. D. Nikiforova Visnik PDABA № 1-2, 2013
5. Vliyanie dlitelnih procesov na napryajenoe i deformirovanoe sostoyanie sooruzheniy. Prokopovich I.E. Gosudarstvenoe izdatelstvo literaturi po stroitelstvu, arhitekture i stroitelnim materialam. M. 1963, 260 s.
6. Kostochka V.A. Vliyanie okruzhayemykh sredy na sostoyanie zalibetonnih konstruktsiy. Akademiya stroitelstva i arhitekturi SamGTU №12, 2019, s. 56-59.
7. Long-term deflections of reinforced concrete elements: accuracy analysis of predictions by different methods. Viktor Gribniak, Darius Bacinskas, Rimantas Kacianauskas, Gintaris Kaklauskas, Lluís Torres. Received: 2 November 2011 / Accepted: 28 July 2012 / Published online: 15 August 2012.
8. DSTU B V.-145:2010 Zahist betonih I zalibetonnih konstruktsiy vid korozii – K. Minregionbud, 2010. – 52 s.
9. Zarakovskaya K.I., Zaharov V.F. Obitnye diagrami sostoyaniya betona sostavnihi gelezobetonih sterjney s visokoprochnoy armaturoy posle dlitelnih ispitaniy. //Vesnik Evraziyskoy nauki, 2018 №3, <https://esj.today/PDF/33SAVN418.pdf>.
10. Krainskiy P.I., Mitsnist ta deformativnist zalibetonnih stisnuto - zignutih elementiv, pidsilenih zalibetonoou oboymou pri dii navantajeniya Speciaknist 05.23.01 – Budivelni konstrukcii, budivli ta sporudi. Disertaciya na zdotyta naukovogo stupeniya kandidata tehnicnih nauk.
11. K. Sadeghi, F. Nouban, "Damage and fatigue quantification of RC structures", Structural Engineering and Mechanics, 58 (6), pp. 1021–1044, 2016.
12. M.M. Lobodanov, P.I. Vehera, Z.Ya Bliarskiy, "Analiz vplyvu osnovnykh vydiv defektiv ta poshkodzen na zalibetonnou zdatnist zalibetonnih elementiv", Visnyk Natsionalnoho

- universytetu «Lvivska politehnika», seria «Teoriia i praktyka budivnytstva», № 888, pp. 93-100, 2018.
13. E. Sola, J. Ožbolt, G. Balabanic, “Modelling Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete: Natural vs. Accelerated Corrosion”, Conference Paper: 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. <https://doi.org/10.21012/FC9.097>, 2016.

Література

1. Фомина И.П. Устойчивость П-образной железобетонной рамы подверженной воздействию агрессивной среды// Вісник ОДАБА. Вып.57, – Одесса, 2014.
2. Бліхарський З.Я. Залізобетонні конструкції в агресивному середовищі за дії навантаження та їх підсилення. Львів. 2011.
3. Бліхарський З. Я. Напружено-деформований стан залізобетонних конструкцій в агресивному середовищі при дії навантаження : дис. д-ра техн. наук: 05.23.01 / Національний ун-т "Львівська політехніка". — Л., 2005. — 348арк.: рис., табл. — Бібліогр.: арк. 298-338.
4. Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій заглиблених будівель з урахуванням їх взаємодії з ґрунтовим масивом. Т. D. Nikiforova Вісник ПДАБА № 1-2, 2013.
5. Влияние длительных процессов на напряженное и деформированное состояния сооружений. Прокопович И.Е. Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. М. 1963, 260 страниц.
6. Косточка В.А. Влияние окружающей среды на состояние железобетонных конструкций. Академия строительства и архитектуры СамГТУ №12, 2019,стр. 56-59.
7. Long-term deflections of reinforced concrete elements: accuracy analysis of predictions by different methods.Viktor Gribniak, Darius Bacinskas, Rimantas Kacianauskas, Gintaris Kaklauskas, Lluís Torres. Received: 2 November 2011 / Accepted: 28 July 2012 / Published online: 15 August 2012.
8. ДСТУ Б В.2.6-145:2010. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії – К. Мінрегіонбуд, 2010.-52 с.
9. Зараковская К.И., Захаров В.Ф. Опытные диаграммы состояния бетона составных железобетонных стержней с высокопрочной арматурой после длительных испытаний // Вестник Евразийской науки, 2018 №3, <https://esj.today/PDF/33SAVN418.pdf> .
10. Країнський Павло Іванович Міцність та деформативність залізобетонних стиснуто - зігнутих елементів, підсилених залізобетонною обоймою при дії навантаження Спеціальність 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.
11. Sadeghi K., Nouban F. Damage and fatigue quantification of RC structures. Structural Engineering and Mechanics. 2016. 58 (6), pp. 1021–1044.
12. Лободанов М.М., Вегера П.І., Бліхарський З.Я. Аналіз впливу основних видів дефектів та пошкоджень на залізобетонну здатність залізобетонних елементів. Вісник Національного університету «Львівська політехніка», серія «Теорія і практика будівництва». 2018. № 888. С. 93-100.
13. Sola E., Ožbolt J., Balabanic G. Modelling Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete: Natural vs. Accelerated Corrosion. Conference Paper: 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. 2016. <https://doi.org/10.21012/FC9.097>.

Фомін Володимир Михайлович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
д.т.н., професор
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна 65029
Fomin@odaba.edu.ua
ORCID: 0000-0003-4814-6415



Фоміна Інна Петрівна

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
старший викладач
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна 65029
Fomina@ogasa.org.ua
ORCID: 0000-0001-7366-1537

For references:

V. Fomin , I. Fomina. (2025). Analysis of the sustainability of a spatial building. Mechanics and Mathematical Methods. VII (1). 58–65.

Для посилань:

Фомін В. М., Фоміна І. П. Аналіз стійкості просторової будівлі.
Механіка та математичні методи, 2025. Т. VII. № 1. С. 58–65.

УДК 004.514

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ НА СУДНАХ МОРСЬКОГО І РІЧКОВОГО ФЛОТУ

Беспалова А. В.¹, Хотін С. Ю.², Коновалов С. М.²

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури

²Одеський національний морський університет

Анотація: Забезпечення морських і річкових суден очищеною прісною водою є завданням першорядної ваги, оскільки від цього залежить забезпечення найважливіших життєвих потреб членів екіпажу і пасажирів судна. Стічні води з суден також необхідно очищати перед викидом в довкілля. Крім того, водоочисне обладнання є однією з ключових систем спеціалізованих суден енерго- і життєзабезпечення. На сучасних суднах водоочисні системи працюють в автоматичному режимі під управлінням комп'ютерів, стабільність роботи яких забезпечує керуюча інформаційна система.

Дана робота присвячена розробці інформаційної системи для управління і контролю над технологічними процесами очищення води, при цьому в ній було вирішено ряд першорядних прикладних завдань.

Розглянуто основні аспекти розробки інформаційної системи для очищення води на суднах морського і річкового флоту різного призначення, включаючи вимоги до системи, її архітектуру, технічні рішення, що використовувались, а також методи аналізу даних та інтеграцію з іншими системами судна. Описані основні вимоги до систем подібного типу, їх архітектура. Був розроблений детальний макет інтерфейсу користувача, який у повному обсязі описує роботу інформаційної системи. Розглянуто формули, які використовуються в даній системі, завдяки яким виконуються розрахунки щодо очищення води, а також електроенергії, що споживає система. Наведені приклади роботи системи на основі розрахунків за розглянутими формами, а також приклади виконання інформаційною системою графіків, які показують ефективність очищення води та споживчої електроенергії за цей час. Також наведена таблиця, яку генерує система, що показує параметри якості води до та після очищення. Все це показує роботу інформаційної системи для очищення води на суднах різного призначення, включаючи спеціальні судна для енергозабезпечення великих будівельних об'єктів і населених пунктів при надзвичайних ситуаціях різного характеру, яка допомагає візуалізувати та аналізувати дані, що дозволяє вчасно вживати необхідних заходів для підтримки високої якості води, а це, в свою чергу, забезпечує безпеку, комфорт та екологічність судноплавства, сприяє виконанню міжнародних стандартів та покращенню загальної екологічної ситуації у світовому океані.

Описана в статті інформаційна система може знайти широке застосування в якості програмного забезпечення роботи автоматизованого водоочисного комплексу на суднах різного призначення.

Ключові слова: інформаційна система, очищення води, судна морського флоту, інтерфейс користувача, візуалізація.



INFORMATION SYSTEM FOR WATER PURIFICATION ON MARINE AND RIVER FLEET VESSELS

A. Bespalova¹, S. Khotin², S. Konovalov²

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

²*Odesa National Maritime University*

Abstract: Providing sea and river vessels with purified fresh water is a task of primary importance, as it depends on providing the most important vital needs of the crew members and passengers of the vessel. Waste water from vessels must also be purified before being released into the environment. In addition, water purification equipment is one of the key systems of specialized energy and life support vessels. On modern ships, water purification systems work in automatic mode under the control of computers, the stability of which is ensured by the control information system.

This work is devoted to the development of an information system for the management and control of technological processes of water purification, while a number of primary applied tasks were solved in it.

The main aspects of the development of an information system for water treatment on ships of the sea and river fleet of various purposes are considered, including the requirements for the system, its composition, the technical solutions that were used, as well as the methods of data analysis and integration with other systems of the ship. The main requirements for systems of this type and their architecture are described. A detailed layout of the user interface was developed, which fully describes the operation of the information system. The formulas used in this system are considered, thanks to which calculations are performed regarding water purification, as well as the electricity consumed by the system. Examples of the system's operation based on calculations based on the considered forms, as well as examples of the execution of graphs by the information system, which show the efficiency of water purification and consumer electricity during this time, are given. Also shown is a table generated by the system showing water quality parameters before and after treatment. All this shows the operation of the information system for water purification on vessels of various purposes, including special vessels for the energy supply of large construction objects and settlements in emergency situations of various nature, which helps to visualize and analyze data, which allows you to take the necessary measures in time to maintain high quality water, and this, in turn, ensures the safety, comfort and environmental friendliness of shipping, contributes to the fulfillment of international standards and the improvement of the general ecological situation in the world ocean.

The information system described in the article can be widely used as software for the operation of an automated water treatment complex on ships of various purposes.

Keywords: information system, water treatment, sea vessels, user interface, visualization.

1 ВСТУП

Експлуатація судів неминуче пов'язана з виникненням та вирішенням проблем охорони навколишнього середовища та із забезпеченням відповідності викидів та скидів забруднюючих речовин сучасним нормативним вимогам. В даний час на флоті переважно застосовуються два способи вирішення проблеми судових відходів [1].

1. Роздільне накопичення всіх видів відходів для здавання на берег.

Перевагою цього є високий ступінь очищення та реутилізації відходів при переробці на великих берегових підприємствах. Крім того, на судні потрібний мінімум спеціального обладнання. Недоліком є необхідність мати ємності, що потребує додаткових приміщень та зменшує провізну здатність. Цей спосіб застосовується на малих судах з нетривалими маршрутами та частими зупинками, але абсолютно неприйнятним для великих транспортних суден.

2. Переробка відходів на борту судна за допомогою спеціальних систем для очищення стічних (СВ) та нафтовмісних (НВ) вод, а також інсинераторів. Перевагами цього є:

- велика автономність плавання,
- скорочення простоїв, мінімальні накопичувальні ємності та, як наслідок, ефективність таких суден.

До недоліків відносяться: складність та дорожнеча зазначених систем, а також спеціального обслуговування, необхідність додаткових витрат енергії. Дане рішення поширилося переважно на морських судах та судах річка-море плавання. Однак наявне обладнання переробки окремих видів відходів у більшості випадків вже морально та фізично застаріло, не завжди забезпечує виконання вимог сучасної документації, що регламентує, нове ж є дорогим при встановленні та в обслуговуванні, має високу енергоємністю і в цілій низці річкових суден з різних причин встановлення зазначених пристроїв неможливе.

Аналіз ситуації питання показує, що остаточний вибір способу видалення забруднень із суден залежить від багатьох факторів.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Через міжнародний характер морських перевезень вже понад півстоліття функціонують міжнародні правила, що регулюють їх санітарні аспекти. Міжнародні санітарні правила 1951 р. замінені Міжнародними медико-санітарними правилами (ММСП), прийнятими ВОЗ у 1969 р. У 2005 році на 58-й сесії Всесвітньої асамблеї охорони здоров'я ММСП були переглянуті та доповнені.

Керівництво з судової санітарії стало офіційним загальносвітовим зведенням санітарних вимог до будівництва та експлуатації суден. Вихідною метою цього документа була стандартизація санітарних заходів, що здійснюються на судах з метою охорони здоров'я пасажирів та працівників та запобігання передачі інфекції з однієї країни до іншої [2].

В останні роки тема екологічної безпеки на морських судах стає дедалі актуальнішою. Одним із ключових аспектів, що потребують особливої уваги, є очищення води [3, 4]. Забруднення води на судах може призвести до серйозних екологічних наслідків та негативно позначитися на здоров'ї екіпажу та пасажирів. Розробка та впровадження сучасних інформаційних систем для очищення води дозволяють не лише покращити якість води на борту, а й забезпечити відповідність суворим міжнародним екологічним стандартам. Крім того вищевказані системи, сприятимуть розробці та створенню високопродуктивних водоопріснювальних установок для суден енергожиттєзабезпечення. [5, 6].

Інформаційна система для очищення води на суднах включає комплекс апаратних і програмних рішень, спрямованих на моніторинг якості води, автоматизацію процесів очищення і своєчасне реагування на відхилення від норм. Така система дозволяє значно підвищити ефективність експлуатації суден, мінімізувати ризики забруднення навколишнього середовища та забезпечити комфортні умови для всіх, хто знаходиться на борту [7, 8].

Мета цієї статті – розглянути основні аспекти розробки інформаційної системи для очищення води на суднах морського і річкового флоту, включаючи вимоги до системи, її архітектуру, технічні рішення, що використовуються, а також методи аналізу даних та інтеграцію з іншими системами судна.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Інформаційна система для очищення води досить складна в технічному та інформаційному аспекті, тому має задовольняти багатьом вимогам, зокрема [9]:

- моніторинг якості води: система повинна вимірювати основні показники якості води, такі як рН (водневий показник – міра кислотності водних розчинів), рівень забруднень, вміст важких металів та мікроорганізмів;
- автоматизація процесів очищення: інформаційна система повинна керувати обладнанням для очищення води в автоматичному режимі, мінімізуючи втручання людини;
- аналіз та звітність: система повинна збирати дані, аналізувати їх та генерувати звіти для прийняття управлінських рішень;
- інтеграція з іншими системами: можливість інтеграції з системами керування судном та екологічного моніторингу.

Архітектура інформаційної системи для очищення води включає декілька ключових компонентів: датчики та сенсори; центральний контролер; очисне обладнання; серверна частина; інтерфейс користувача; системи судна.

Взаємодію цих компонентів між собою схематично показано на рис. 1.



Рис. 1. Схема очищення води на судні

Датчики та сенсори встановлюються в різних точках системи очищення, вони вимірюють параметри якості води (рН, турбідність (каламутність), вміст хлору і т.д.).

Центральний контролер збирає дані з датчиків та керує роботою очисного обладнання.

Очисне обладнання складається з різних пристроїв для очищення води: фільтри, насоси, ультрафіолетові лампи та ін. Також він здійснює фізичне та хімічне очищення води. Серверна частина зберігає та обробляє дані. Може бути реалізована як на борту судна, так і у хмарі.

Інтерфейс користувача – панель керування, що надає доступ до моніторингу системи та керування нею, може бути доступний з комп'ютера або мобільного пристрою.

Далі йде інтеграція з іншими системами судна: система управління судном (передача даних про якість води до системи управління судном для прийняття рішень капітаном та командою), екологічний моніторинг (інтеграція із системою екологічного моніторингу для дотримання міжнародних стандартів та норм) тощо.

Для розробки інтерфейсу програми з очищення води на судах морського флоту важливо забезпечити зручність використання, інформативність та функціональність. Нижче наведено приклад макету інтерфейсу інформаційної системи, який включає основні елементи управління та моніторингу (рис. 2):

- головна панель;
- моніторинг якості води;
- керування очисним обладнанням;
- аналіз даних та звіти;
- налаштування системи;
- повідомлення та оповіщення.

Головна панель

Інформаційна система очищення води

Рівень pH: 7.0 Температура: 25 °C

Турбідність: 0.5 NTU Хлор: 0.5 ppm

Мікроорганізми: 1 CFU/ml

1. Моніторинг якості води

2. Керування очисним обладнанням

3. Аналіз даних та звіти

4. Налаштування системи

5. Повідомлення та оповіщення

a)

Моніторинг якості води

Рівень pH: 7.0

Турбідність: 0.5 NTU

Хлор: 0.5 ppm

Мікроорганізми: 1 CFU/ml

Графіки та тренди:

Графік рівня pH

Графік турбідності

Графік залишкового хлору

Графік ефективності фільтрації

Графік споживання електроенергії

Назад

b)

Керування очисним обладнанням

Насоси: Увімк./Вимк Фільтри: Увімк./Вимк

УФ-лампи: Увімк./Вимк

Хімікати: Увімк./Вимк

Режим роботи:

Автоматичний

Ручний

Назад

c)

Аналіз даних та звіти

Вибір періоду:

Останні 24 години

Останні 7 днів

Останній місяць

Звіти:

Стан води

Ефективність очищення

Назад

d)

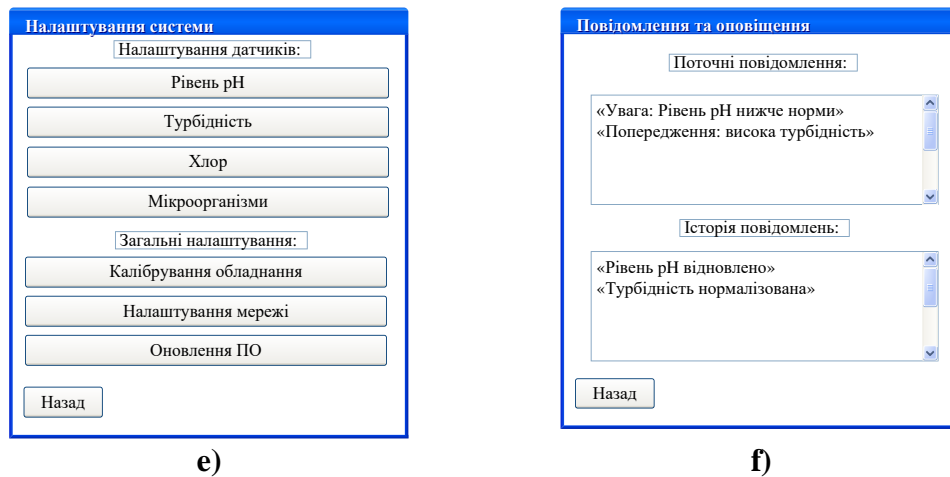


Рис. 2. Основні елементи інтерфейсу:

а) головна панель; б) моніторинг якості води; в) управління очисним обладнанням; г) аналіз даних та звіти; е) налаштування системи; ф) повідомлення та оповіщення

Головна панель надає загальний огляд стану системи та основних параметрів якості води. Екран моніторингу якості води надає детальну інформацію про поточний стан води. Екран керування дозволяє контролювати та керувати очисним обладнанням. Екран аналізу даних надає можливість переглядати та генерувати звіти про стан води. Екран налаштувань дозволяє змінювати параметри системи та конфігурацію датчиків. Екран повідомлень показує поточні та минулі оповіщення системи.

Математична модель опріснювальної установки з МСП розроблена в [10, 11] і заснована на рівняннях збереження маси й енергії. Однак наведена там система рівнянь є перевизначеною, у результаті чого ітераційний процес розрахунків не приводить до вирішення.

Приведемо кілька важливих формул, які використовуються інформаційною системою для очищення води:

1. Формула для розрахунку рН. Рівень рН води є важливим параметром, який вимірюється у процесі очищення. Він визначається як негативний логарифм концентрації іонів водню

$$pH = -\log [H^+],$$

де $[H^+]$ – концентрація іонів водню в молях на літр (моль/л).

2. Формула для розрахунку турбідності (каламутності). Турбідність (каламутність) води вимірюється в NTU (Nephelometric Turbidity Units), і може бути представлена через коефіцієнт розсіювання світла частинками, що знаходяться у воді

$$T = \frac{I_0}{I},$$

де T – турбідність (каламутність) (NTU);

I_0 – інтенсивність світла, що проходить через чисту воду;

I – інтенсивність світла, що проходить через зразок води.

3. Формула для розрахунку залишкового хлору. Залишковий хлор у воді визначається як різниця між введеним хлором і хлором, що реагував із забруднювачами

$$Cl_{res} = Cl_{total} - Cl_{react},$$

де Cl_{res} – залишковий хлор (ppm);

Cl_{total} – загальний введений хлор (ppm);

Cl_{react} – хлор, що реагував із забруднювачами (ppm).

4. Формула для розрахунку ефективності фільтрації. Ефективність фільтрації може бути оцінена за такою формулою

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%,$$

де η – ефективність фільтрації (%);

C_{in} – концентрація забруднювачів на вході (мг/л);

C_{out} – концентрація забруднювачів на виході (мг/л).

5. Формула для розрахунку споживання електроенергії. Споживання електроенергії системою очищення води можна розрахувати таким чином

$$E = P \times t,$$

де E – споживання електроенергії (кВт год);

P – потужність обладнання (кВт);

t – час роботи обладнання (години).

Використання даних формул дозволяє не тільки автоматизувати процеси моніторингу та управління системою очищення води на судах, а й проводити аналітичну роботу з оптимізації цих процесів. Впровадження таких математичних підходів сприяє підвищенню загальної ефективності та надійності роботи системи, забезпечуючи стабільну якість води на борту суден.

Розглянемо приклади розрахунку представлених вище формул:

Приклад 1: Розрахунок рівня рН. Якщо концентрація іонів водню у воді $[H^+]$

становить 1×10^{-7} моль/л, то рівень рН дорівнюватиме

$$pH = -\log[1 \times 10^{-7}] = 7.$$

Приклад 2: Розрахунок турбідності (каламутності). Якщо інтенсивність світла, що проходить через чисту воду I_0 становить 100 одиниць, а інтенсивність світла, що проходить через зразок води I – 5 одиниць, то турбідність T можна розрахувати так

$$T = \frac{5}{100} = 0.05 NTU.$$

Це спрощений приклад, що показує принцип розрахунку турбідності. У реальній практиці точність вимірювань та розрахунку може залежати від калібрування обладнання, умов вимірювання та характеристик частинок у воді.

Приклад 3: Розрахунок залишкового хлору. Якщо загальний введений хлор Cl_{total} становить 2.0 ppm, а хлор, що реагував із забруднювачами Cl_{react} – 1.5 ppm, то залишковий хлор Cl_{res} дорівнюватиме

$$Cl_{res} = 2.0 \text{ ppm} - 1.5 \text{ ppm} = 0.5 \text{ ppm}$$

Приклад 4: Розрахунок ефективності фільтрації. Якщо концентрація забруднювачів на вході фільтра C_{in} становить 10 мг/л, а на виході C_{out} – 1 мг/л, то ефективність фільтрації η буде

$$\eta = \frac{10-1}{10} \times 100\% = 90\%.$$

Приклад 5: Розрахунок споживання електроенергії. Якщо потужність обладнання P становить 2.5 кВт, а час роботи обладнання t – 8 годин, то споживання електроенергії E можна розрахувати так

$$E = 2.5 \text{ кВт} \times 8 \text{ годин} = 20 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Крім цього, наведено приклади візуалізації інформаційною системою графіків, які наочно показують важливі аспекти системи очищення води, зокрема графіків рівня рН (рис. 3), рівня турбідності (рис. 4), зміни рівня залишкового хлору (рис. 5), ефективності фільтрації забруднювачів (рис. 6) та розрахунку споживання енергії в системі очищення води (рис. 7).

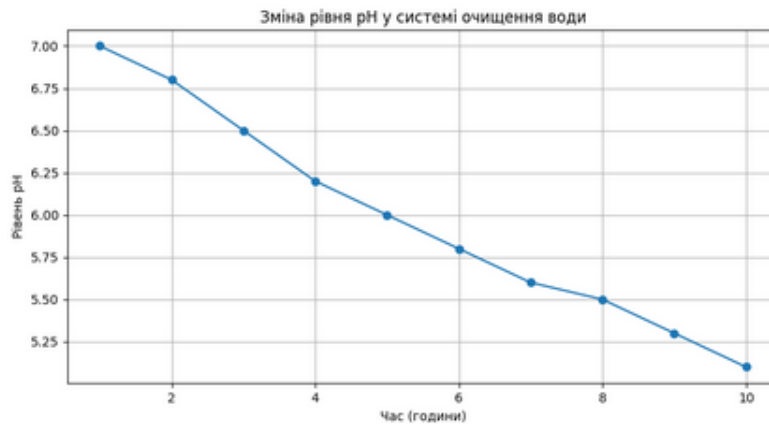


Рис. 3. Зміна рівня рН у системі очищення води

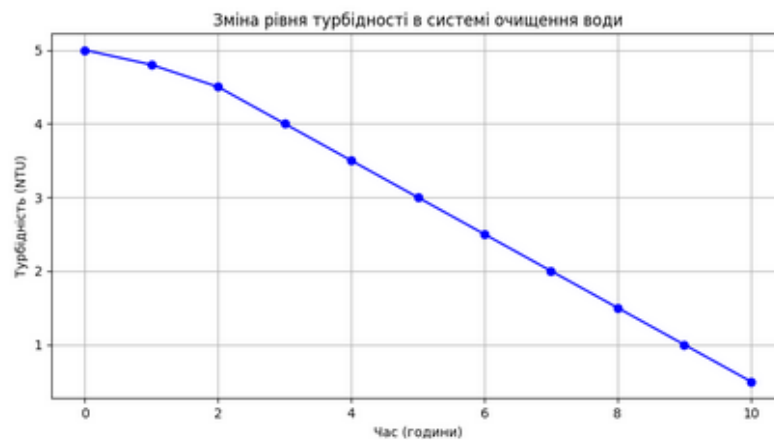


Рис. 4. Зміна рівня турбідності в системі очищення води

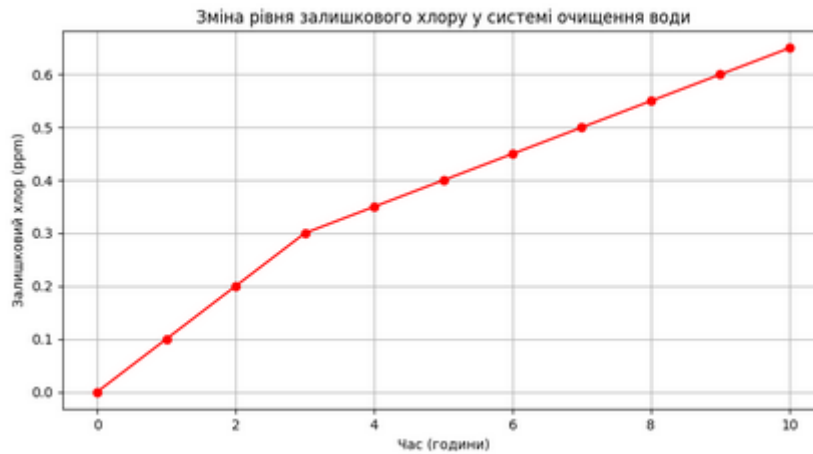


Рис. 5. Зміна рівня залишкового хлору у системі очищення води

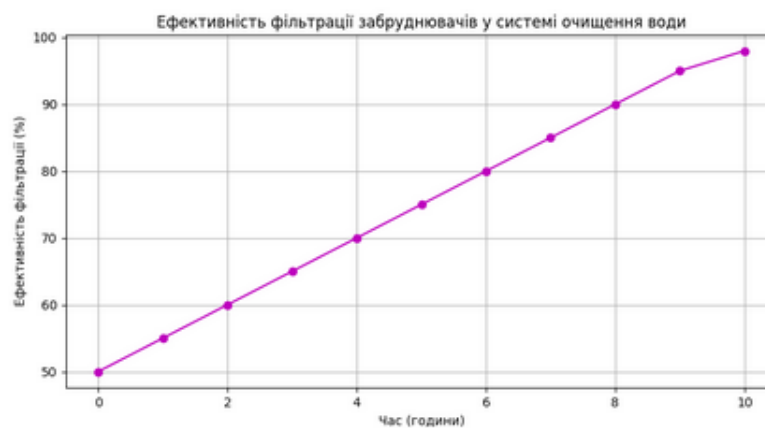


Рис. 6. Ефективність фільтрації забруднювачів у системі очищення води

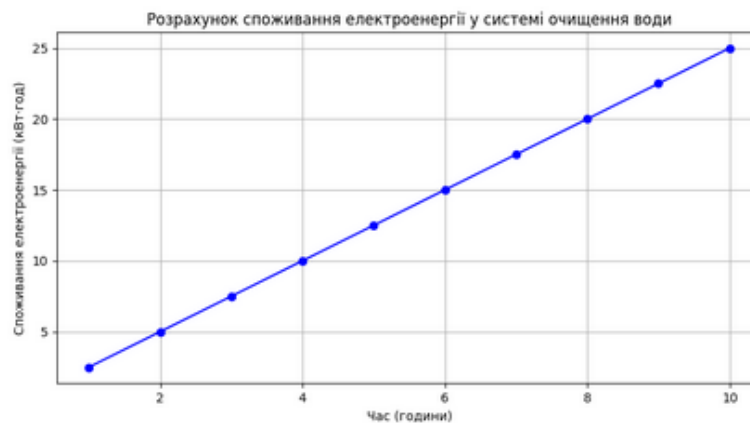


Рис. 7. Розрахунок споживання електроенергії у системі очищення води

На цих графіках видно, як рівні рН і турбідності (каламутності) води поступово знижуються в міру проходження процесу очищення протягом 10 годин, при цьому, рівень залишкового хлору, ефективність фільтрації забруднювачів, а також споживання енергії, за ці ж 10 годин, навпаки, підвищуються. Такі графіки допомагають візуалізувати ефективність системи очищення води та приймати рішення для її оптимізації, а також планувати енергоспоживання та керування ресурсами.

Інформаційна система дозволяє збирати дані про роботу системи очищення води та аналізувати їх за допомогою різних методів. Це включає в себе:

- аналіз трендів – виявлення довгострокових змін у параметрах якості води;

– порівняльний аналіз – порівняння ефективності різних методів очищення;
– звіти та повідомлення – автоматичне створення звітів та повідомлення відповідальних осіб про виникнення проблем.

Зокрема, до звіту про ефективність очищення входить подібна таблиця про параметри якості води до та після очищення (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри якості води до та після очищення

Параметр	До очищення	Після очищення
Рівень рН	6.0	7.0
Турбідність (NTU)	5.0	0.5
Хлор (ppm)	0.0	0.5
Мікроорганізми	1000 CFU/ml	1 CFU/ml

Таблиця 1 демонструє покращення якості води після проходження через систему очищення.

4 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сучасні технології моніторингу та автоматизації процесів очищення води значно підвищують точність контролю та оперативність реагування на зміни параметрів води. Інтеграція інформаційної системи з іншими системами судна, такими як система управління судном та екологічний моніторинг сприяє створенню єдиного інформаційного простору, що підвищує загальну ефективність управління судном.

На прикладі аналізу зміни рівня рН, турбідності, рівня залишкового хлору, ефективності фільтрації забруднювачів, а також розрахунку споживання енергії в системі очищення води було показано, як використання інформаційної системи допомагає візуалізувати та аналізувати дані, що дозволяє вчасно вживати необхідних заходів для підтримки високої якості води.

5 ВИСНОВКИ

Розробка та впровадження інформаційної системи для очищення води на суднах морського і річкового флоту є важливими кроками на шляху до підвищення екологічної безпеки та ефективності судноплавства. Така система дозволяє забезпечити стабільну якість води, необхідну для здоров'я екіпажу та пасажирів, а також мінімізувати негативний вплив на довкілля. Крім цього, вищеописана інформаційна система забезпечить ефективне функціонування водоочисних установок суден для енергозабезпечення великих будівельних об'єктів і прибережних населених пунктів.

Таким чином, інформаційна система для очищення води на морських і річкових суднах різного призначення є невід'ємним елементом сучасної морської інфраструктури, що забезпечує безпеку, комфорт та екологічність судноплавства, а також дозволить вирішити проблему водопостачання прибережних населених пунктів та об'єктів економіки. Впровадження таких систем сприяє не тільки виконанню міжнародних стандартів, а й покращенню загальної екологічної ситуації у світовому океані, а крім того, вони допоможуть забезпечити поліпшення умов життя і роботи людей, які проживають в прибережних районах, в тому числі і при надзвичайних ситуаціях.

6 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Публікуючи статтю, її автори не переслідують ніяких фінансово-комерційних інтересів і дозволяють безоплатно використовувати її матеріали іншим особам для цитування в наукових дослідженнях, за умови вказівки посилань на неї в своїх наукових роботах, якщо вони не є діяльністю комерційного характеру з метою особистого збагачення.

Література

1. Судовые установки очистки сточных вод: способы очистки, устройство, эксплуатация: справ. пособие / Н.Г. Ермошкин [и др.]. 56 р. (2004).
2. Guide to Ship Sanitation. 3rd ed. Geneva: World Health Organization. (2011).
3. Кузьмінчук А. Опріснення морської води [Електронний ресурс] / А. Кузьмінчук – Режим доступу до ресурсу: <https://ecosoft.ua/ua/blog/opresnenie-morskoy-vody/> (дата звернення: 07.07.2024).
4. Зданевич Л.М. Проектна робота «Методи очищення вод» [Електронний ресурс] / Л.М. Зданевич. (2018). Режим доступу до ресурсу: <https://naurok.com.ua/proektna-robota-metodi-ochischennya-vod-43733.html> (дата звернення: 07.07.2024).
5. Єрмолаєв В.П. Правила запобігання забрудненню з суден / В.П. Єрмолаєв, А.О. Білокурець. – Київ: Регістр судноплавства України, 237 р. (2020).
6. Щелкунов А. Правила реєстрації операцій із шкідливими речовинами на суднах, у морських та річкових портах і терміналах / А. Щелкунов., 8 р. (2021).
7. Білокурець А.О. Правила щодо обладнання морських суден / А.О. Білокурець, В.П. Єрмолаєв. – Київ: Регістр судноплавства України, 385 р. (2020).
8. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту. Колективна монографія /за редакцією В. Чимшир /. – Ізмаїл: ДІ НУ «ОМА» Київ: Міленіум, 472 с. (2020). ISBN 978-966-8063-81-6.
9. Сучасні методи очищення судових стічних та ляльних вод різного походження для зрошування сільськогосподарських культур: монографія / В.О. Чабан – Херсон: ХДМА, 2020. – 132 с. ISBN 978-966-2245-64-6.
10. Al- Juwayhel F. Analysis of single- effect evaporator desalination systems combined with vapor compression heat pumps / F. Al- Juwayhel, H. El- Dessouky, H. Ettouney // Desalination. Vol. 114. P. 253–275. (1997). DOI: 10.1016/S0011-9164(98)00017-4.
11. El- Dessouky H. T. Fundamentals of sea water desalination / H. T. El- Dessouky, H. M. Ettouney. – Amsterdam: Elsevier, 670 p. (2002).

References

1. Sudovyie ustanovki ochistki stochnyih vod: sposobyi ochistki, ustroystvo, ekspluatatsiya: sprav. posobie / N.G. Ermoshkin [i dr.]. 56 r. (2004).
2. Guide to Ship Sanitation. 3rd ed. Geneva: World Health Organization. (2011).
3. Kuzminchuk A. Oprisnennia morskoi vody [Elektronnyi resurs] / A. Kuzminchuk – Rezhym dostupu do resursu: <https://ecosoft.ua/ua/blog/opresnenie-morskoy-vody/> (data zvernennia: 07.07.2024).
4. Zdanevych L.M. Proektna robota «Metody ochyshchennia vod» [Elektronnyi resurs] / L.M. Zdanevych. (2018). Rezhym dostupu do resursu: <https://naurok.com.ua/proektna-robota-metodi-ochischennya-vod-43733.html> (data zvernennia: 07.07.2024).
5. Iermolaiev V.P. Pravyla zapobihannia zabrudnenniu z suden / V.P. Yermolaiev, A.O. Bilokurets. – Kyiv: Rehistr sudnoplavstva Ukrainy, 237 r. (2020).
6. Shchelkunov A. Pravyla reiestratsii operatsii iz shkidlyvymy rechovynamy na sudnakh, u morskikh ta richkovykh portakh i terminalakh / A. Shchelkunov., 8 r. (2021).

7. Bilokurets A.O. Pravyla shchodo obladnannia morskykh suden / A.O. Bilokurets, V.P. Yermolaiev. – Kyiv: Rehistr sudnoplavstva Ukrainy, 385 r. (2020).
8. Suchasni pidkhody do vysokoefektyvnoho vykorystannia zasobiv transportu. Kolektyvna monohrafiia /za redaktsiieiu V. Chymshyr /. – Izmail: DI NU «OMA» Kyiv: Milenium, 472 s. (2020). ISBN 978-966-8063-81-6.
9. Suchasni metody ochyshchennia sudnovykh stichnykh ta llialnykh vod riznoho pokhodzhennia dlia zroshuvannia silskohospodarskykh kultur: monohrafiia / V.O. Chaban – Kherson: KhDMA, 2020. – 132 s. ISBN 978-966-2245-64-6.
10. Al- Juwayhel F. Analysis of single- effect evaporator desalination systems combined with vapor compression heat pumps / F. Al- Juwayhel, H. El- Dessouky, H. Ettouney // Desalination. Vol. 114. P. 253–275. (1997). DOI: 10.1016/S0011-9164(98)00017-4.
11. El- Dessouky H. T. Fundamentals of sea water desalination / H. T. El- Dessouky, H. M. Ettouney. – Amsterdam: Elsevier, 670 p. (2002).

Беспалова Алла Вікторівна

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
д.т.н., професор
вул. Дідріхсона, 4 Одеса, Україна, 65029
bespalova.a.v.2015@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3713-0610

Хотін Сергій Юрійович

Одеський національний морський університет,
к.т.н., доцент
вул. Мечникова, 34, Одеса, Україна, 65029
enhelios@ukr.net,
ORCID: 0000-0003-2424-9276

Коновалов Сергій Миколайович

Одеський національний морський університет
старший викладач
вул. Мечникова, 34, Одеса, Україна, 65029
wertfaert@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2533-8660

Для посилань:

Беспалова А. В., Хотін С. Ю., Коновалов С. М. Інформаційна система для очищення води на судах морського та річкового флоту. Механіка та математичні методи, 2025. Т. VII. №. 1. с. 66–77.

For references:

A. Bespalova, S. Khotin, S. Konovalov. (2025). Information system for water purification on marine and river fleet vessels. Mechanics and Mathematical Methods. VII (1). 66-77.

УДК 622.4

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВЕНТИЛЯЦІЇ НА КОНЦЕНТРАЦІЮ РАДОНУ В ПРИМІЩЕННІ

Кіосак В. А.¹, Патрашку Є. В.¹

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація: Широкий спектр будівельних матеріалів та конструктивних рішень, що застосовуються в сучасному будівництві дозволяють регулювати концентрацію радону в приміщеннях. Але через відсутність методів проектного розрахунку не можуть повністю замінити собою вентиляцію, в тому числі і примусову. Проектування радонобезпечних і одночасно ресурсоефективних будівель можливо лише на основі теоретично обґрунтованих розрахункових методів, що пов'язують між собою процеси утворення радону, закономірності його перенесення та накопичення в приміщеннях.

Математичне моделювання має більші перспективи для опису та аналізу таких багатофакторних процесів, а також вимагає значно менших часових та матеріальних витрат ніж натурні дослідження. Сучасний рівень знань в даній області не дозволяє створити універсальної моделі. Тому використовуються математичні моделі з певними обмеженнями.

В даній роботі будується та досліджується математична модель, яка описує процес зміни концентрації радону в житловому приміщенні при вентиляції, в тому числі примусовій. Моделювання дозволяє нам зрозуміти складні явища, зокрема те, яку роль відіграє дифузія, а яку конвекція. Врахування конвекції, тобто руху радону під дією повітряних потоків і різниць тиску, дозволяє імітувати різні стратегії вентиляції. Встановлено зв'язок між швидкістю механічної системи вентиляції та видаленням радону з приміщення. Запропонована нами модель враховує як дифузійний, так і конвекційний тип поширення радону в приміщенні. Вона дозволяє оцінити в конкретних числових параметрах роль вентиляції в зменшенні концентрації радону та оптимізувати системи вентиляції з урахуванням необхідності мінімізації концентрації радону в будівлях.

Результати можуть бути використані в безпосередніх розрахунках, а також при побудові більш загальних моделей організації повітряного обміну в приміщеннях як виробничих, так і житлових.

Ключові слова: математична модель, концентрація радону, системи вентиляції, житловий комфорт.

MODELLING THE EFFECT OF VENTILATION ON INDOOR RADON CONCENTRATION

V. Kiosak¹, Ye. Patrashku¹

¹Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract: A wide range of building materials and design solutions used in modern construction make it possible to regulate the radon concentration in premises. However, due to the lack of design calculation methods, they cannot completely replace ventilation, including forced ventilation. The design of radon-safe and resource-efficient buildings is possible only on the basis of theoretically sound calculation methods that link the processes of radon formation, the patterns of its transfer and accumulation in the premises.

Mathematical modelling has greater prospects for describing and analysing such multifactorial processes, and requires significantly less time and material costs than field studies. The current level of knowledge in this area does not allow for the creation of a universal model. Therefore, mathematical models with certain limitations are used.

In this paper, we build and study a mathematical model that describes the process of changing the radon concentration in a residential building during ventilation, including forced ventilation.



Modelling allows us to understand complex phenomena, in particular, what role diffusion plays and what role convection plays. Taking into account the convection, i.e. the movement of radon under the influence of air flows and pressure differences, allows us to simulate different ventilation strategies. The relationship between the speed of the mechanical ventilation system and radon removal from the room is established.

The model we propose takes into account both diffusion and convection types of radon propagation in a room. It allows us to estimate the role of ventilation in reducing radon concentration in specific numerical parameters and optimise ventilation systems to minimise radon concentration in buildings.

The results can be used in direct calculations, as well as in the construction of more general models of air exchange in both industrial and residential premises.

Keywords: mathematical model, radon concentration, ventilation systems, residential comfort.

1 ВСТУП

Розрахунки показують, що близько 80% часу люди проводять у приміщеннях, що пояснює значну дозу опромінення (до 65%) населення природними радіонуклідами (ПРН), які містяться в будівельних матеріалах, виробках та конструкціях. Це підкреслює важливість обмеження опромінення людей природними джерелами іонізуючого випромінювання шляхом зниження радіаційного фону мінеральної сировини, що використовується при виробництві будівельних матеріалів. Таким чином, питання отримання екологічно безпечних будівельних матеріалів залишається актуальним.

Довгоживучі природні радіоактивні елементи (K, Ra, ^{232}Th , U та ін.) та їх короткоживучі дочірні радіонукліди є основними джерелами радіаційного фону в середовищі людини. Зокрема, радіоактивний газ радон (^{222}Rn) і дочірні аерозольні продукти його розпаду відповідають за понад половину природного опромінення. Зараз середня річна доза опромінення населення становить 2,4 мЗв (240 мбер), з яких 1,5 мЗв (150 мбер) припадає на внутрішнє опромінення радоном. Для забезпечення радонової безпеки необхідні удосконалені методи розрахунку радіоактивності повітряного середовища [1], які можуть бути створені на основі фізико-математичних моделей процесів виділення радону та його проникнення в приміщення. Проте роль дифузійних процесів еманції радону з мінеральної сировини у формуванні безпечного та комфортного середовища помешкання людини ще недостатньо вивчені.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Вплив радону на людей, у тій чи іншій мірі, охоплює все населення планети незалежно від статі, віку та професійної діяльності [2]. Дослідження рівня радону проводяться в питній воді [3, 4], природному газі [5], ґрунтовому повітрі [6], атмосферному повітрі [7]. Проте найбільша кількість робіт у багатьох країнах зосереджена на дослідженнях вмісту радону в повітрі приміщень житлових та громадських будівель [5, 8]. Інформація про високі рівні радону в повітрі житлових будинків, що не пов'язані з виробничою діяльністю уранових шахт, вперше з'явилася у Швеції в середині ХХ століття [9]. Це стало поштовхом для масових обстежень по всьому світу, результати яких пізніше були узагальнені та представлені у доповідях Наукового комітету з дії атомної радіації при Організації Об'єднаних Націй (НКДАР ООН) [10].

Інтерес до громадських будівель виник у дослідників порівняно нещодавно, і в основному обстежувались приміщення дитячих установ [8]. Дітям та співробітникам доводиться проводити більше часу в освітніх установах, ніж у будь-якому іншому місці, окрім дому. В оглядовій статті [9] автори зазначають, що рівні радону в повітрі приміщень дитячих установ вищі, ніж у житлових будівлях, через особливості вентиляційних та опалювальних систем. Крім того, у будівлях, зведених у середині ХХ століття та раніше, радіаційний контроль вмісту радону в повітрі не проводився. В проектах будівель часто не передбачались підвальні приміщення, які могли б виконувати роль "буфера" для ексхалтації радону з поверхні підстиляючого ґрунту.

У більшості зарубіжних країн рівень радону в повітрі вимірюється в одиницях активності радону (ОА), однак у низці пострадянських країн (Азербайджан, Білорусь, Киргизія, Молдова, Таджикистан, Україна) використовуються показники середньорічної еквівалентної одиниці активності (ЕРОА) ізотопів радону (^{222}Rn , ^{220}Rn) [1]. Це спричиняє труднощі та помилки при співпраці з міжнародними організаціями, такими як НКДАР ООН і ВООЗ [2, 10]. Враховуючи, що радіометри аерозолів є

основним інструментом вимірювань, перехід на нормування за одиницями активності радону вимагає великих фінансових витрат та часу [8].

За оцінками, середній рівень об'ємної активності (ОА) радону в повітрі приміщень по світу становить близько 40 Бк/м³, проте в країнах з високим природним радіаційним фоном (Швейцарія, Сербія) цей рівень може в кілька разів перевищувати середньосвітовий [2]. Наприклад, в школах і дитячих садках 20 країн рівень ОА радону варіюється від 17 Бк/м³ (Саудівська Аравія) до 317 Бк/м³ (Словаччина) [11]. У період з 2010 по 2020 рік рівень ОА радону в приміщеннях початкових класів різних країн варіювався від 27 до 480 Бк/м³, середнє значення становило 133,43±95,14 Бк/м³, а середнє геометричне – 109,06±1,87 Бк/м³ [9]. У 63 країнах, зокрема 42 європейських, середнє арифметичне значення ОА радону в повітрі приміщень дитячих садків і шкіл становило 59 Бк/м³, а середнє геометричне — 36 Бк/м³ [8]. Відомо, що в 1/3 обстежених приміщень дитячих установ Португалії та Іспанії рівень ОА радону перевищував референтний рівень 300 Бк/м³, а в 75% приміщень перевищував рекомендований ВООЗ рівень 100 Бк/м³ [9]. У США, зокрема в штаті Нью-Йорк, рівень ОА радону в школах варіювався від 148 Бк/м³ до 740 Бк/м³, перевищуючи встановлені норми [2]. Не менш характерною є ситуація в Чорногорії, де середня ОА радону в повітрі приміщень 213 дитячих садків перевищувала 300 Бк/м³, а в 111 приміщеннях 47 шкіл рівень перевищував 1000 Бк/м³ [12]. Це свідчить про ризик розвитку радон-індукованого раку легень при тривалому перебуванні в погано вентильованих приміщеннях. У Фінляндії максимальний рівень ОА радону в дитячих садках і школах становив 2426 Бк/м³ та 4205 Бк/м³ відповідно, що вимагало негайних дій з боку освітніх установ для зниження рівня радону [11].

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є розвиток теоретичних основ моделювання розповсюдження газу радон в приміщенні. Основні задачі дослідження – це розробки методів оцінки змін концентрації радону в будівлі при переході від активного до пасивного режимів експлуатації, а також, оцінка кратності обміну повітряної маси для зниження концентрації радону. Під активним режимом експлуатації приміщення розуміємо режим утримання приміщення при активній діяльності людини, а пасивний режим в протилежному випадку.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Суть розробленого підходу до визначення механізмів і параметрів надходження радону полягає в безперервному вимірюванні концентрації радону і різниці температур зовні і всередині приміщення з кроком в одну годину [3]. Такі умови проведення вимірювань необхідні для відстеження динаміки концентрації радону під час переходу приміщення з активного режиму експлуатації (під час активної діяльності людини в приміщенні) у стаціонарний стан (коли люди покидають приміщення наприкінці робочого дня або лягають спати). У стаціонарному стані природний повітрообмін у приміщенні за визначенням менший, ніж в активному режимі, і при цьому відбувається накопичення радону в приміщенні (зростання концентрації). Пропонується використовувати при обробці вимірювань не досягнуте максимальне значення концентрації радону в приміщенні, а всю криву накопичення. Такий принцип обробки вимірювань близький до методу вимірювань у накопичувальній камері, описаного в роботі [3]. Визначення параметрів надходження і накопичення радону в розробленому підході проводиться на підставі аналізу часового ряду зміни концентрації радону.

Типовий вигляд часового ряду концентрації радону (A , Бк/м³) наведено на рис. 1. Близький до наведеного характер зміни концентрації радону в часі показано в багатьох роботах [3, 8].

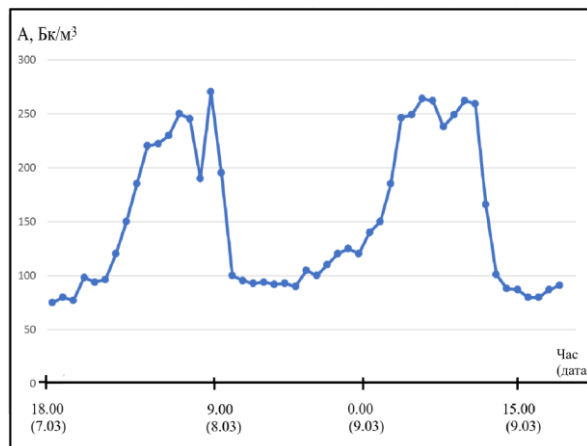


Рис. 1. Типовий вид часового ряду концентрації радону

Накопичення радону для стаціонарного режиму експлуатації приміщення являє собою процес із виходом на насичення. При цьому, вихід значення концентрації радону в приміщенні на рівновагу визначається деякими постійними параметрами (швидкістю надходження радону і кратністю повітрообміну). Для оцінки цих параметрів необхідно математично описати процес зміни концентрації радону в часі. Дослідження, присвячені надходженню радону в приміщення будівель, традиційно спираються на різного роду математичні моделі. Це зумовлено насамперед тим, що складність визначення реального надходження радону в конкретні будівлі не дає змоги проводити експериментальні вимірювання всіх необхідних параметрів. Тимчасова залежність концентрації радону $A(t)$ у приміщенні може бути представлена у вигляді відомого диференціального рівняння першого порядку (передбачається, що радон перемішується миттєво по всьому об'єму приміщення)

$$\frac{dA(t)}{dt} = S(t) - (A(t) - A_{R_n}^{amm}) \lambda_v(t) - (A(t) - A_{R_n}^{amm}) \lambda_{R_n}, \quad (1)$$

де: функція $S(t)$ описує сумарне питоме надходження радону в одиничний об'єм приміщення (швидкість надходження), Бк/(м³·год); $\lambda_v(t)$ – функція, що описує залежність значення кратності повітрообміну від часу, год⁻¹; $\lambda_{R_n} = 0,00755 \text{ год}^{-1}$ – постійна розпаду радону; $A_{R_n}^{amm}$ – концентрація радону в зовнішньому повітрі, Бк/м³.

Оскільки навіть повністю закриті приміщення матиме кратність повітрообміну в стаціонарному режимі експлуатації на рівні принаймні 0,05 год⁻¹, що набагато більше за постійну розпаду, третім членом рівняння (1) можна знехтувати.

У свою чергу, для м. Одеси середня концентрація радону у зовнішньому повітрі $A_{R_n}^{amm}$ (отримана на підставі тривалого повноsezонного вимірювання повноsezонного вимірювання за допомогою радон-монітора AlphaGUARD) становить 12 Бк/м³.

Таким чином, внесок $A_{R_n}^{amm}$ у рівні концентрації радону надалі також не враховувався.

Сумарна швидкість надходження радону S_0 у певний момент часу зумовлена двома основними механізмами: дифузійним і конвективним $S_0 = S_D + S_C$, де S_D і S_C

відповідно швидкості дифузійного та конвективного надходження радону в приміщення, Бк/(м³·год).

Для опису швидкості дифузійного надходження радону, S_D , вводять до розгляду щільність потоку радону (швидкість ексхаляції радону) q , так що $S_D = \frac{\sum_j q_j \Pi_j}{V}$, де q_j – швидкість ексхаляції радону з j -ої поверхні, Бк/(м²·с), площа якої дорівнює Π_j , м²; V – об'єм приміщення, м³.

Швидкість ексхаляції радону можна безпосередньо пов'язати з питомою активністю радію-226 у будівельному матеріалі $q = C_{R_a} \rho E \sqrt{\frac{\lambda_{R_n} D_c}{\varepsilon}} \operatorname{th} \left(d \sqrt{\frac{\lambda_{R_n} \varepsilon}{D_c}} \right)$, де C_{R_a} – питома активність радію-226 у матеріалі шару, Бк/кг; ρ – щільність матеріалу, кг/м³; E – коефіцієнт еманування радону; D_c – коефіцієнт дифузії в матеріалі шару, м²·с⁻¹; ε – пористість матеріалу; d – половина товщини шару матеріалу, м.

Базовий підхід до опису швидкості конвективного надходження радону в приміщення ґрунтується на простій аналогії потоку, викликаного різницею тисків [3]. У цьому випадку, швидкість конвективного надходження радону, S_c , описується формулою $S_c = A_c \frac{\Delta P}{R_c} V^{-1}$, де A_c – концентрація радону в конвективному потоці повітря, Бк/м³; ΔP – різниця тисків, що зумовлює конвективний потік, Па; R_c – загальний опір конструкції будівлі надходженню конвективного потоку повітря, Па·с·м³.

Параметри в правій частині рівняння безпосередньо залежать від того, яке середовище або простір є джерелом конвективного потоку повітря. Це може бути підпільний простір під будівлею або інше приміщення. Детальніші моделі конвективного механізму надходження радону в приміщення ґрунтуються на введенні в розгляд специфічних параметрів, що характеризують конкретні властивості будівлі та кліматичні умови [3].

Так, у рамках моделі, яку використовують у Фінському Центрі радіаційної та ядерної безпеки [11], різниця тисків у ґрунтовому повітрі та у приміщенні на рівні підлоги пов'язується з різницею температур у приміщенні T_{in} і в зовнішній атмосфері T_{out} та рівнем нейтрального тиску H_{npl} (Neutral Pressure Level), на якому досягається рівність тисків усередині та зовні будівлі. Тоді [11] $\Delta P = \rho_0 g H_{npl} \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}}$, де ρ_0 – густина повітря за нормального тиску, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с².

У [3, 9] ключовими характеристиками будівлі виступають ефективна площа натікання Π_{nat}^{ef} і площа натікання радону $\Pi_{nat}^{R_n}$. Ефективна площа натікання Π_{nat}^{ef} показує площу відкритих ділянок в оболонці будівлі, через які повітря може надходити або виходити з будівлі. Введення і широке використання параметра Π_{nat}^{ef} тісно пов'язане з тим, що було створено і відпрацьовано експериментальну процедуру його вимірювання за допомогою нагнітальних дверей (аеродвері) [5]. За аналогією з ефективною площею натікання, для опису конвективного перенесення радону в будівлю використовується таке поняття, як площа натікання радону $\Pi_{nat}^{R_n}$. Згідно з [3] швидкість конвективного надходження радону S_c , зумовлена ефектом димаря (стек-

ефектом), може бути виражена через площу натікання радону $\Pi_{nat}^{R_n}$ та показник степеня n_r , який залежить від аеродинамічних характеристик місць інфільтрації та ексфільтрації повітря в будівлі $S_c = A_c \Pi_{nat}^{R_n} \nu_0 \left(\frac{\Delta \rho g H}{P_0} \right) V^{-1}$, де H – висота будівлі, а різниця густин повітря $\Delta \rho = \rho_0 (T_{in} - T_{out}) / T_{in}$ визначається через різницю температур усередині будівлі та поза нею, ν_0 – швидкість інфільтрації повітря, пов'язана з величиною тиску P_0 , м/с.

Наведені підходи до моделювання конвективного надходження дають можливість робити принципові висновки про залежність концентрації радону в приміщенні від різниці температур між внутрішнім об'ємом приміщення і зовнішньою атмосферою $\Delta T = T_{in} - T_{out}$.

Зокрема, у роботі [11], модель, розроблена у Фінському Центрі радіаційної та ядерної безпеки, була використана для вивчення сезонних варіацій концентрації радону.

Теоретичні уявлення та експериментальні дані про зв'язок швидкості надходження радону з різницею температур ΔT дають змогу запропонувати спосіб визначення внеску дифузійного та конвективного потоку (механізму надходження) радону в приміщення на підставі вивчення залежності концентрації радону від різниці температур між внутрішнім об'ємом приміщення і зовнішньою атмосферою.

Швидкість надходження радону S_0 для $\Delta T \neq 0$ обумовлена сумарним дифузійним і конвективним надходженням радону в приміщення. З огляду на те, що конвективний потік радону в приміщенні визначається різницею температур ΔT , при $\Delta T = 0$ внесок цього механізму в сумарну швидкість надходження можна виключити. Тому швидкість надходження радону S_0 при $\Delta T = 0$ відповідатиме швидкості дифузійного надходження радону.

Залежність швидкості надходження радону в приміщення S_0 для рівних різниць температур ΔT дає змогу встановити домінуючий потік радону – дифузійний, за відсутності залежності швидкості надходження радону від ΔT , або конвективний, що відповідає значному зростанню швидкості надходження радону зі зростанням ΔT . При цьому, внесок дифузійного потоку радону в приміщенні може бути визначено як відношення швидкості надходження радону при нульовій різниці температур ΔT до швидкості надходження радону при середній заданій різниці температур ΔT_{cp} :

$$M(\%) = \rho_0 \frac{S_0(0)}{S_0(\Delta T_{cp})} 100\%. \quad \text{З урахуванням прийнятих припущень загальний}$$

розв'язок рівняння (1) може бути представлено у вигляді $A(t)e^{\int \lambda_v(t) dt} = \int S(t)e^{\int \lambda_v(t) dt} dt + A_0$, де A_0 – константа інтегрування, що відповідає концентрації радону в початковий момент часу, Бк/м³.

Розв'язок рівняння для часової залежності концентрації радону $A(t)$ описується таким виразом

$$A(t) = e^{-\int \lambda_v(t) dt} \int S(t)e^{\int \lambda_v(t) dt} dt + A_0 e^{-\int \lambda_v(t) dt}. \quad (2)$$

У роботі [3] показано, що в межах добових вимірювань значення швидкості надходження радону не зазнає істотних змін у часі. Таким чином, для характерного необхідного для отримання кривої накопичення радону добового періоду, зміна

сумарної швидкості надходження радону визначатиметься виключно різницею температури ΔT . Якщо тепер припустити, що кратність повітрообміну постійна величина, що відповідає стаціонарному режиму експлуатації приміщення, то рівняння може бути записано у вигляді

$$A(t) = \frac{S_0}{\lambda_0} + \left(A_0 - \frac{S_0}{\lambda_0} \right) e^{-\lambda_0 t}, \quad (3)$$

де λ_0 – кратність повітрообміну за стаціонарного режиму експлуатації приміщення, год⁻¹; S_0 – сумарна швидкість надходження радону в одиничний об'єм приміщення, Бк/(м³·год).

Накопичення активності являє собою процес, обумовлений швидкістю надходження радону в приміщення і кратністю повітрообміну в стаціонарному стані, з виходом на насичення $A_{\max} = S_0 / \lambda_0$. У цьому випадку, рівняння (3) набуває вигляду

$$A(t) = A_{\max} (1 - e^{-\lambda_0 t}) + A_0 e^{-\lambda_0 t}, \quad (4)$$

де A_{\max} – максимальна концентрація радону, яка може бути досягнута в приміщенні за заданих умов, Бк/м³.

Рівняння (3), у якому $\lambda_v = \lambda_0$, описує процес накопичення радону у квазістаціонарному стані приміщення. У реальності активна діяльність людини в приміщенні призводить до змін кратності повітрообміну. При цьому процес накопичення активності не досягає свого насичення і не завжди виходить у стаціонарний стан, тому представляє інтерес опис часових рядів концентрації радону в діючих приміщеннях зі змінною кратністю повітрообміну для отримання параметрів реальних співвідношень між режимами повітрообміну. Для цього необхідно описати функцію $\lambda_v(t)$.

Під час переходу приміщення в активний режим експлуатації (наприклад, під час відчинення вікон) функція $\lambda_v(t)$ демонструватиме ступінчасте зростання. Під час зачинення вікон, кратність повітрообміну повертатиметься до свого стаціонарного значення λ_0 . Процес зміни функції $\lambda_v(t)$ під час відчинення вікон або ввімкнення примусової вентиляції (як процеси, які найбільш значуще впливають на значення кратності повітрообміну) зручно описати за допомогою функції Хевісайда $\theta(t)$, таким виразом: $\lambda_v(t) = \lambda_0 + \lambda \theta(N-t)$, де N характеризує тривалість провітрювання, год; λ – додаткова кратність повітрообміну, зумовлена діяльністю людини, 1 (при цьому, $\lambda_{\text{акт}} = \lambda + \lambda_0$ відповідає кратності повітрообміну за активного режиму експлуатації приміщення).

Функція Хевісайда може бути записана у вигляді безперервної функції $\theta(N-t) \approx \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{e^{2(k(N-t))} - 1}{e^{2(k(N-t))} + 1}$, де k – коефіцієнт підйому, більшому k відповідає крутіший підйом функції в точці $t = N$.

Таким чином, для процесу зміни функції $\lambda_v(t)$ під час відкривання вікна було прийнято вираз (5)

$$\lambda_v(t) = \lambda_0 + \frac{\lambda}{2} \left(1 + \frac{e^{2(kN-kt)} - 1}{e^{2(kN-kt)} + 1} \right). \quad (5)$$

Зручно покласти коефіцієнт $k = 50$, при цьому час переходу між станами становить приблизно 5 хвилин, що набагато менше кроку вимірювань, який дорівнює 60 хвилинам.

Підставивши вираз (5) для кратності повітрообміну в загальний розв'язок рівняння для часової залежності концентрації радону $A(t)$ (2), і поклавши швидкість надходження радону до приміщення такою, що дорівнює величині S_0 , отримаємо такий вираз

$$A(t) = \frac{1}{6} e^{-\lambda_0 t} (W - e^{-2kt} (W - 1))^{-\lambda/2k} (S_0 \lambda_0^2 t^3 + 3S_0 \lambda_0 t^2 + S_0 \lambda t^2 + S_0 \lambda t^2 (W - 1) 2k W t - 2\lambda_0 t + \lambda t (W - 1) - 3) + 6S_0 t + 6A_0 e^{-\lambda N} W^{-\lambda/2k}, \quad (6)$$

де $W = (e^{2N} + 1)^{-1}$.

Якщо тепер покласти, що $\lambda = 0$ (при значенні кратності повітрообміну $\lambda_v = \lambda_0$, що відповідає кратності повітрообміну в стаціонарному режимі експлуатації приміщення), отримаємо для виразу (6)

$$A(t) = \frac{S_0}{\lambda_0} e^{-\lambda_0 t} \left(\lambda_0 t + \frac{1}{2} \lambda_0^2 t^2 + \frac{1}{6} \lambda_0^3 t^3 \right) + A_0 e^{-\lambda_0 t}. \quad (7)$$

Оскільки вираз $1 + \lambda_0 t + \frac{1}{2!} \lambda_0^2 t^2 + \frac{1}{3!} \lambda_0^3 t^3 \dots$ являє собою розкладання функції $e^{\lambda_0 t}$ в ряд Тейлора, то вираз (7) при $\lambda = 0$ відповідає отриманому.

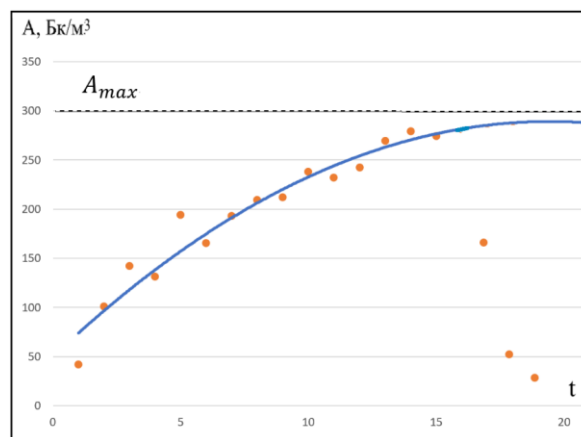


Рис. 2. Часова залежність концентрації радону, що характеризує перехід із стаціонарного до активного режиму експлуатації

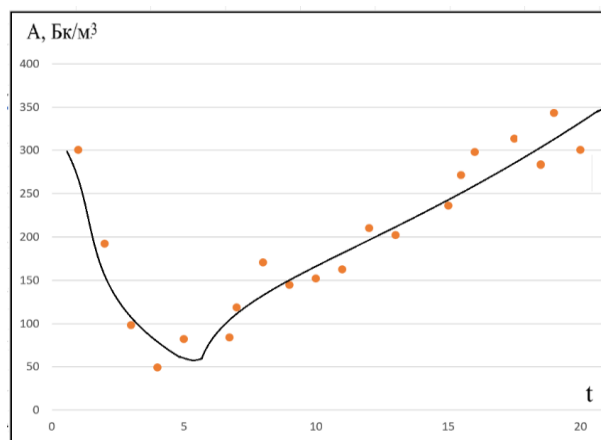


Рис. 3. Часова залежність концентрації радону, що характеризує перехід із активного до стаціонарного режиму експлуатації

Раніше рівнянню часової залежності концентрації радону для постійної стаціонарної кратності повітрообміну (4).

Рівняння (6) можна вважати базовим для моделювання надходження і накопичення радону в атмосфері приміщень.

Простіший вираз (4) для постійної кратності повітрообміну також дає змогу одержати значення швидкості надходження радону S_0 і кратності повітрообміну λ_0 . Своєю чергою рівняння (6) дає змогу отримати значення кратності повітрообміну в активному режимі експлуатації $\lambda_{акт}$.

Рівняння (4) і (6) були використані для опису ділянок часового ряду концентрації радону, що характеризують переходи приміщення зі стаціонарного в активний режим експлуатації. Після виділення шуканих ділянок кожна з кривих зміни концентрації радону задавалася нелінійною регресійною моделлю за допомогою рівнянь (4) (Рис.2) або (6) (Рис.3).

На підставі оцінки параметрів регресійної моделі можуть бути отримані основні значення, що цікавлять: сумарна швидкість надходження радону S_0 , λ_0 (кратність повітрообміну у стаціонарному режимі експлуатації), $\lambda_{акт} = \lambda + \lambda_0$ (кратність повітрообміну в активному режимі). При цьому середнє значення $\lambda_{ср}$ може бути отримано усередненням значень кратності повітрообміну λ_0 і $\lambda_{акт}$ з вагами, відповідними часу знаходження приміщення в стаціонарному і активному режимах експлуатації.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Вентиляція відіграє важливу роль у зменшенні накопичення радону в житлових приміщеннях, сприяючи обміну повітря в приміщенні з зовнішнім повітрям, що допомагає знизити концентрацію радону. Математичне моделювання конвекційних механізмів і дифузії радону допомагають зрозуміти складні процеси, за допомогою яких радон рухається всередині будівель.

Математичні рівняння дозволяють описати, як радон потрапляє в будівлі, як він рухається крізь різні матеріали і як він накопичується в різних зонах (у підвалах або на перших поверхах). Моделювання використовується для точного прогнозу рівнів радону за різних умов (швидкість вентиляції, будівельні матеріали, погодні умови). Ці прогнози мають важливе значення для оцінки ризику та забезпечення того, щоб концентрація радону залишалася нижче безпечного рівня. Такі моделі особливо корисні, коли неможливо провести масштабні вимірювання в кожній будівлі або на кожній ділянці.

Математичні моделі можуть імітувати, як різні стратегії вентиляції (відкриття вікон, механічні системи вентиляції) впливають на концентрацію радону в будівлі. Розуміючи взаємозв'язок між швидкістю вентиляції та видаленням радону, проєктувальники та інженери будівель можуть оптимізувати системи вентиляції для мінімізації радону.

6 ВИСНОВКИ

Таким чином, вентиляція відіграє важливу роль в управлінні концентрацією радону в приміщенні, сприяючи повітрообміну, зменшуючи надходження радону і запобігаючи його накопиченню в житлових приміщеннях, тим самим захищаючи мешканців від опромінення радоном.

Нами запропоновано математичну модель, що описує роль вентиляції у зменшенні концентрації радону з урахуванням як дифузійного, так і конвективного механізмів поширення радону в приміщенні. Узагальнена модель дає змогу оцінити в конкретних цифрових параметрах роль вентиляції у зменшенні концентрації радону. Ці оцінки відіграють важливу роль при обґрунтуванні економічної ефективності наявної вентиляційної системи та дозволяють задавати цільові параметри проєктованих вентиляційних систем.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

Література

1. Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання. Закон України від 17.09.2023 №15/98-ВР. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80#>
2. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva : WHO Press, 2009. 110 p. ISBN 978-92-4-154767-3.
3. Komov I.L., Frolov O.S., Didenko P.I. et al. Methods and Facilities for the Assessment of the Radon-Hazard Potential. Kyiv: Logos. 2004. 416 p.
4. Management of radioactivity in drinking-water. Geneva : WHO Press, 2018. 104 p. ISBN 978-92-4-151374-6.
5. Antignani S., Venoso G., Ampollini M. et al. A 10-year follow-up study of yearly indoor radon measurements in homes, review of other studies and implications on lung cancer risk estimates. Science of The Total Environment. 2021. 762. P.144150. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720376816>
6. Kaur M., Kumar A., Mehra R., Mishra R. Study of radon/thoron exhalation rate, soil-gas radon concentration, and assessment of indoor radon/thoron concentration in Siwalik Himalayas of Jammu & Kashmir. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 2018. 24(8). P.22752287. doi: 10.1080/10807039.2018.1443793
7. Celikovic I., Pantelic G., Vukanac I. [et al.]. Outdoor radon as a tool to estimate radon priority areas - a literature overview. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. 19(2). P. 662. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/2/662>
8. Sa, J. P. [et al.]. Radon in indoor air: towards continuous monitoring. Sustainability. 2022. 14(3). P. 1529. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/3/1529>
9. Su C., Pan M., Zhang Y. [et al.]. Indoor exposure levels of radon in dwellings, schools, and offices in China from 2000 to 2020: A systematic review. Indoor Air. 2022. 32(1).P. 12920. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ina.12920>
10. Ionizing radiation: sources and biological effects. UNSCEAR 1982 Report to the General Assembly, with annexes. New York : United Nations, 1982. 773 p. ISBN 92-1-142200-0.
11. Kojo K., Kurttio P. Indoor Radon Measurements in Finnish Daycare Centers and Schools - Enforcement of the Radiation Act. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. 17(8). P. 2877. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/8/2877>
12. Vukotic P., Zekic R., Andjelic T., Svrkota N. [et al.]. Radon on the ground floor in the buildings of pre-university education in Montenegro Nukleonika, 2020. 65. P.53-58. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:219548331>

References

1. Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання. Закон України від 17.09.2023 №15/98-ВР. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80#>
2. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. (2009). Geneva: WHO Press. ISBN 978-92-4-154767-3.
3. Komov, I.L., Frolov, O.S., Didenko, P.I. et al. (2004), *Methods and Facilities for the Assessment of the Radon-Hazard Potential*. Kyiv: Logos.

4. Management of radioactivity in drinking-water. (2018), Geneva: WHO Press. ISBN 978-92-4-151374-6.
5. Antignani, S., Venoso, G., Ampollini, M. et al. (2021). A 10-year follow-up study of yearly indoor radon measurements in homes, review of other studies and implications on lung cancer risk estimates. *Science of The Total Environment*. (762). 144150. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720376816>
6. Kaur, M., Kumar, A., Mehra, R., Mishra, R. (2018). Study of radon/thoron exhalation rate, soil-gas radon concentration, and assessment of indoor radon/thoron concentration in Siwalik Himalayas of Jammu & Kashmir. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 24(8). 22752287. doi: 10.1080/10807039.2018.1443793
7. Celikovic, I., Pantelic, G., Vukanac, I. et al. (2022). Outdoor radon as a tool to estimate radon priority areas - a literature overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(2). 662. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/2/662>
8. Sa, J. P. et al. (2022). Radon in indoor air: towards continuous monitoring. *Sustainability*. 14(3). 1529. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/3/1529>
9. Su C., Pan M., Zhang Y. et al. (2022), Indoor exposure levels of radon in dwellings, schools, and offices in China from 2000 to 2020: A systematic review. *Indoor Air*. 32(1). 12920. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ina.12920>
10. Ionizing radiation: sources and biological effects. UNSCEAR 1982 Report to the General Assembly, with annexes. (1982). New York: United Nations. ISBN 92-1-142200-0.
11. Kojo, K., Kurttio, P. (2020). Indoor Radon Measurements in Finnish Daycare Centers and Schools -Enforcement of the Radiation Act. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 17(8). P.2877. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/8/2877>
12. Vukotic, P., Zekic, R., Andjelic, T., Svrkota, N. et al. (2020). Radon on the ground floor in the buildings of pre-university education in Montenegro. *Nukleonika*. (65). 53-58. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:219548331>

Кіосак Володимир Анатолійович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
д.ф.-м.н., професор,
вул. Дідріхсона, 4 Одеса, Україна, 65029
kiosakv@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-7433-6709

Патрашку Євген Вікторович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
аспірант
вул. Дідріхсона, 4 Одеса, Україна, 65029
patrashku07@gmail.com
ORCID: 0009-0008-4802-2889

Для посилань:

Кіосак В. А., Патрашку Є. В. Моделювання впливу вентиляції на концентрацію радону в приміщенні. *Механіка та математичні методи*, 2025. Т. VII. №. 1. С. 78–89.

For references:

V. Kiosak, Ye. Patrashku. (2025). Modelling the effect of ventilation on indoor radon concentration. *Mechanics and Mathematical Methods*. VII (1). 78-89.

UDC 536.24.021

NON-FOURIER HEAT CONDUCTION IN TWO-DIMENSIONAL MEDIA

O. Pysarenko¹

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

Abstract: Real-time heat distribution and phase transformation based on operating conditions and material properties can be estimated using heat equations. The corresponding characteristic functions are used to analyze heat conduction processes in various fields, including laser and electron beam processing. A powerful universal analytical and numerical method that transforms partial differential equations into a coupled system of ordinary differential equations is the wavelet transform method. Fourier and non-Fourier heat equations can be implemented for both equilibrium and non-equilibrium thermodynamic processes, including a wide range of processes such as the two-temperature model, ultrafast laser irradiation, and biological processes. The ultrafast laser heating process of nanofilms is characterized by ultrashort duration and ultrasmall spatial size, in which the classical Fourier law based on the local equilibrium hypothesis is no longer applicable. Based on the Cattaneo-Vernotte model and the double phase delay model, two-dimensional analytical solutions of thermal conductivity in two-dimensional structures under the action of ultrafast laser are obtained using the integral transform method. The results show that there is a thermal wave phenomenon inside the film, which becomes increasingly obvious as the temperature gradient delay time elapses. In this paper, non-Fourier heat conduction problems with temperature and heat flux relaxations are studied based on the wavelet finite element method and solved by the central difference scheme for one-dimensional and two-dimensional media. The heat wave model and the double phase delay model are used to formulate the finite elements, and a new formulation of the wavelet finite element solution is proposed to solve the computational optimization problem. Compared with the current methodologies for the heat wave model and the dual phase delay model, the present model is a direct model that describes the thermal behavior with a single equation with respect to temperature. The developed method can be used for arbitrary shapes. A new iteration update methodology is also proposed for the dual phase delay model to solve the computationally efficient problems. The time iteration algorithms do not use the global stiffness matrix. This allows for optimized calculations. Numerical calculations were performed in comparison with the classical finite element method and the spectral finite element method. The comparisons in accuracy, efficiency, flexibility and applicability confirm that the developed method is an effective and alternative tool for thermal analysis of local volumes of two-dimensional materials.

Keywords: heat wave, heat flux, wavelet-transform, non-Fourier heat conduction, two-dimensional material.

ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ НЕ-ФУР'Є ТИПУ У ДВОВИМІРНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Писаренко О. М.¹

¹*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

Анотація: Розподіл тепла в реальному часі та фазове перетворення на основі умов експлуатації та властивостей матеріалу можна оцінити за допомогою рівнянь теплопровідності. Відповідні характеристичні функції використовуються для аналізу процесів теплопровідності в різних областях, включаючи лазерну та електронно-променеву обробку. Потужним універсальним аналітичним і чисельним методом, який перетворює диференціальні рівняння в частинних похідних у пов'язану систему звичайних диференціальних рівнянь, є метод вейвлет-перетворення. Рівняння теплоємності, що описуються та не описуються Фур'є рівняннями можуть бути реалізовані як для рівноважних, так і для нерівноважних термодинамічних



процесів, включаючи широкий спектр процесів, таких як двотемпературна модель, надшвидке лазерне опромінення та біологічні процеси. Надшвидкий процес лазерного нагріву наноплівки характеризується надкороткою тривалістю та надмалим просторовим розміром, у якому класичний закон Фур'є, заснований на гіпотезі локальної рівноваги, більше не застосовний. На основі моделі Каттанео-Вернотта та моделі подвійної фазової затримки методом інтегрального перетворення отримано двовимірні аналітичні рішення теплопровідності у двовимірних структурах під дією надшвидкого лазера. Результати показують, що всередині плівки існує явище теплової хвилі, яке стає все більш очевидним у міру того, як минає час затримки градієнта температури. У цій роботі досліджуються не Фур'є-теплопровідні задачі з релаксацією температури та теплового потоку на основі вейвлет-методу скінченних елементів і розв'язуються центрально-різницевою схемою для одновимірного та двовимірного середовища. Модель теплової хвилі та модель подвійної фазової затримки використовуються для формулювання скінченних елементів, а також пропонується нове формулювання вейвлетного скінченно-елементного рішення для вирішення проблеми обчислювальної оптимізації. У порівнянні з поточними методологіями для моделі теплової хвилі та моделі двофазної затримки, ця модель є прямою моделлю, яка описує теплову поведінку за допомогою єдиного рівняння щодо температури. Розроблений метод можна використовувати для довільних форм. Нова методологія оновлення ітерації також пропонується для двофазової моделі затримки для ефективного вирішення обчислювальних проблем. Алгоритми часових ітерацій не використовують глобальну матрицю жорсткості. Це дозволяє оптимізувати розрахунки. Чисельні розрахунки проводились у порівнянні з класичним методом скінченних елементів та спектральним методом скінченних елементів. Порівняння точності, ефективності, гнучкості та застосовності підтверджують, що розроблений метод є ефективним та альтернативним інструментом для термічного аналізу локальних об'ємів двовимірних матеріалів.

Ключові слова: хвиля тепла, тепловий потік, вейвлет-перетворення, теплопровідність не Фур'є типу, двовимірний матеріал.

1 INTRODUCTION

The treatment of some film materials with high-intensity and ultrashort laser radiation leads to the appearance of microscale hot spots of heat transfer. In this case, experiments indicate the appearance of sharp wave fronts responsible for the temperature rise, which are difficult to interpret by the classical Fourier model. The macroscopic heat wave model can be considered as the first attempt to describe heat transport at the microscale. A subsequent modification led to the hyperbolic equation of thermal state and assumed the description of heat transport by a wave with a finite velocity. A number of attempts to describe heat transport at the microscale were supplemented by the Cattaneo-Vernotte model and the dual-phase model with delay.

However, the two-stage model and the later proposed pure phonon field model suggest that the microscale thermal behavior follows neither the pattern given by the thermal wave model nor the Fourier diffusion model. To fill the gap between the microscopic and macroscopic theories, a double-phase-lag model was proposed according to two time constants in the thermal evolution equation. The double-phase-lag model aims to eliminate the precedence assumption made in mesoscale heat transport models. The basic procedure in these considerations is to fix the cause-and-effect relationship between the temperature gradient and the heat flux. It should be emphasized that the models for the meso- and microscales are derived using a Taylor series expansion. In fact, this method of derivation is incompatible with the second law of thermodynamics. Moreover, the equations of the double-phase-delay model are a special, linearized version of the Jeffrey equation and use interdependent parameters.

2 ANALYSIS OF LITERATURE DATA AND RESOLVING THE PROBLEM

Compared to the parabolic diffusion equation, the Fourier model and the double phase delay model are hyperbolic methods. As a result, there is a resurgent interest in solving heat equations given by a model that takes into account the finite speed of heat wave propagation in the tested media. The set of numerical schemes for solving the heat conduction equation can be divided into both analytical and numerical solutions. The most widely used methodologies are those using the Laplace transform [1, 2], Green function [3, 4] and the integral equation method [5, 6]. The rather complex mathematical transformations that are necessary in analytical methods represent the main obstacles to their practical application. Due to the complexity of the hyperbolic equation, which leads to ambiguity in the tested domain, only very few simple cases can be solved analytically. Consequently, numerical solutions and methods attract more attention.

However, the exact solution for the two-dimensional film material is still sometimes not easy to obtain. One of the most common techniques for analyzing this problem is the finite difference method [7-10]. A significant improvement of this approach was the finite difference algorithm, based on which a convergent three-level finite difference scheme was developed [11-13] and a high-accuracy finite difference method for solving the two-dimensional problem [14-16]. The discontinuous finite difference model [17, 18] has enabled the analysis of heat wave propagation in one-dimensional and two-dimensional media using a double-delayed phase model. Modification of the finite difference method by wavelet transforms is not widely used in analytical methods of studying heat conduction processes in two-dimensional structures. However, it should be noted that the effectiveness of wavelet transforms has been previously tested for dynamic analysis and elastic wave problems.

This study aims to develop a wavelet transform formulation for the finite difference method and corresponding solution methodologies for non-Fourier heat conduction, in particular, for the heat wave model and the double phase delay model.

3 PURPOSE AND OBJECTIVES OF THE STUDY

Since the heat diffusion equation is parabolic in nature, it is easy to see from the idea of wave motion that this equation implies an infinite speed of heat wave propagation. In turn, this indicates that a local change in the heat flux q spatial r and temporal t coordinates can lead to an instantaneous perturbation of the temperature field Θ . It was verified that the conclusion is inconsistent with experiments. With the development of materials processing using pulsed sources and the requirement of laser-induced guide waves in structural health monitoring, the classical Fourier law has been shown to be inadequate in modeling high-frequency response. The above problems have led to many attempts to improve the classical model, the most famous of which is probably the thermal wave model, which takes into account thermal "inertia".

In this model, the approximation of the heat transfer process can be described by a Jeffreys-type constitutive relation

$$\tau_0 \Theta_{tt}(r,t) + \Theta_t(r,t) - \alpha \Delta \Theta = Q(r,t) / (\rho c) + \tau_0 Q_t(r,t) / (\rho c),$$

where τ_0 – is the relaxation time; Q – depicts the heat source; ρ – is the density; c – is the specific heat of the material; $\alpha = \kappa / (\rho c)$ – is the thermal diffusivity; κ – is the conductivity for thermal medium.

It should be noted that this equation cannot be considered as a real approximation of the single-phase delay relationship, which leads to ill-posed problems. A series of experimental studies have confirmed that the thermal wave model performs better than the classical Fourier law in numerical prediction. At the same time, it has been found that the model only takes into account fast transient effects, but not microstructural interactions. These two effects can be reasonably represented by the double-phase-delay model as the relationship between the heat flux q and the temperature gradient $\nabla \Theta$

$$\tau_0 \Theta_{tt}(r,t) + \Theta_t(r,t) - \alpha \Delta \Theta(r,t) - \alpha \tau_\circ [\Delta \Theta(r,t)]_t = Q(r,t) / (\rho c) + \tau_0 Q_t(r,t) / (\rho c),$$

where τ_\circ is the delay time caused by the micro-structural interactions (phase-lag of the temperature gradient).

The extreme nature of the thermal parameters used in numerical calculations of pulsed thermal action by a laser leads to difficulties at the stage of modeling the processes. As a rule, the models of the thermal wave and double phase delay are usually transformed into the corresponding normalized forms. At the first stage, the parameters of the excited pulse are subjected to a non-dimensionalization procedure. Next, a Gaussian profile is used to model the light intensity of laser pulses

$$Q = \frac{(1-R)I_0}{\sqrt{\pi}t_p} \exp\left(1 - t^2 / t_p^2\right),$$

where R – is the reflectivity of irradiated surface; I_0 – is the laser output intensity; t_p – is the full-width-at-half-maximum of pulse.

The set of dimensionless parameters of length (X, Y, R_c) , time $(\gamma, \gamma_1, \gamma_2)$, temperature (β) , heat flux (φ) , and heat source (Ψ) were used in this study



$$X = \frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau_0}}, \quad Y = \frac{y}{2\sqrt{\alpha\tau_0}}, \quad R_c = \frac{r_c}{2\sqrt{\alpha\tau_0}}, \quad \gamma = \frac{t}{2\tau_0}, \quad \gamma_1 = \frac{t_p}{2\tau_0}, \quad \gamma_2 = \frac{\tau_\Theta}{2\tau_0},$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi\tau_0}{\alpha}} \frac{\kappa(\Theta - \Theta_0)}{(1-R)I_0}, \quad \phi = \frac{\tau_0\sqrt{\pi}}{(1-R)I_0} q, \quad \psi = \frac{2\tau_0\sqrt{\pi\alpha\tau_0}}{(1-R)I_0},$$

where T_0 – is the reference temperature.

In this case, the dimensionless model with a phase delay of the Jeffreys constitutive type is rewritten as

$$\beta_{\gamma\gamma} + 2\beta_\gamma - \Delta\beta - \gamma_2[\Delta\beta]_\gamma = 2\psi + \psi_\gamma,$$

and for the value Ψ the following relation can be written

$$\psi = \frac{\sqrt{\alpha\tau_0}}{\gamma_1} \exp(1 - \gamma^2 / \gamma_1^2).$$

Both models contain partial differential equations which, after transformation, can be used in the finite difference method to describe heat transfer processes for boundary conditions of different types.

The finite element method involves first partitioning the domain Ω into a grid in terms of a set of non-overlapping subdomains Ω_e . Subsequently, each subdomain is mapped onto a unit interval taking into account the dimensionality of the problem being analyzed. The finite element method is complemented by wavelet transforms. In the unit interval, some wavelets of the m -th order B -spline j on the interval $\eta_{j,m,k}(\xi)$ are used to construct wavelet finite element formulations for the heat transfer problem. According to the m -th order B -spline functions corresponding wavelets with m -th order ($BSWI_{mj}$) can be determined. In this case, the inner B -spline describes a mesh of m segments for the cases A1 (no boundaries), A2 (internal nodes), and A3 (presence of one boundary):

$$A1: x_{-m+1}^j = x_{-m+2}^j = \dots = x_0^j = 0,$$

$$A2: x_k^j = k2^k, k = 0, 1, \dots, 2^j,$$

$$A3: x_{2^{j+1}}^j = x_{2^{j+2}}^j = \dots = x_{2^{j+m-1}}^j = 1.$$

An arbitrarily specified scale j immediately fixes the discretization step, which in this case is equal to $1/2^j$. At the next stage, in order to introduce at least one internal B-spline function into the working area, the following condition is checked for feasibility

$$2^j \geq 2m - 1.$$

Assuming that j_0 is the initial scale, for each previously considered case ($A_i, i = 1, 2, 3$) for $j \geq j_0$ we get:

$$A1: \eta_{m,k}^j(\xi) = \eta_{m,k}^{j_0}(2^{j-j_0}\xi), k = -m+1, \dots, -1;$$

$$A2: \eta_{m,k}^j(\xi) = \eta_{m,2^{j-m-k}}^{j_0}(1 - 2^{j-j_0}\xi), k = 2^j - m + 1, \dots, 2^j - 1;$$

$$A3: \eta_{m,k}^j(\xi) = \eta_{m,0}^{j_0}(2^{j-j_0}\xi - 2^{-j_0}k), k = 0, \dots, 2^j - m.$$



The scaling functions $\eta_{j,m,k}(\xi)$ satisfy the relation:

$$\eta_{m,k}^j = \eta_{m,k}^{j_0} \left(2^{j-j_0} \xi \right), k = -m+1, \dots, -1;$$

$$\eta_{m,k}^j = \eta_{m,2^j-m-k}^{j_0} \left(2^{j-j_0} \xi \right), k = 2^j - m + 1, \dots, 2^j - 1;$$

$$\eta_{m,k}^j = \eta_{m,0}^{j_0} \left(2^{j-j_0} \xi - 2^{-j_0} k \right), k = 0, \dots, 2^j - m.$$

The system of primary scaling functions allows for a full scaling of the wavelet transforms, which fix both the main interpolating function and the shape function in the parent wavelet. For the two-dimensional case, we then define the horizontal and vertical interpolating vectors based on the equation:

$$\eta_\xi = \left\{ \eta_{m,-m+1}^j(\xi) \eta_{m,-m+2}^j(\xi) \dots \eta_{m,2^j-1}^j(\xi) \right\}, \eta_\chi = \left\{ \eta_{m,-m+1}^j(\chi) \eta_{m,-m+2}^j(\chi) \dots \eta_{m,2^j-1}^j(\chi) \right\},$$

where ξ, η belong to the interval $[0, 1]$, which depict the normalized x and y coordinates, respectively.

The two-dimensional interpolating function is formulated based on the Kronecker product between two vectors in the characteristic equation. The basic procedures of two-dimensional analysis can be carried out for the basic functions of wavelet transforms. Within the framework of the finite element method, the unknown continuous function of the temperature field $\Theta(\xi, \chi, t)$ can be interpolated in the elementary domain as

$$\Theta(\xi, \chi, t) = S \Theta^e,$$

where S is the interpolating function; Θ^e is the nodal temperature in an element.

The analysis of the variants of constructing the computational grid showed that there is more than one node in the element. Only for such a case the interpolating function and nodal temperature can be written in matrix form. In this work, the third-order wavelet transform function is chosen as the interpolating function S .

The physical field of two-dimensional composite structures can be written in terms of wavelet coefficients. In this case, for the convergence of the calculation procedure in wavelet interpolations, an additional transformation matrix is required. This matrix Θ is used to transform the wavelet coefficients into the physical domain. After the specified steps, the interpolation of the value S can be carried out, namely

$$\eta \Theta = S.$$

and for the transformation matrices we get

$$\hat{\Theta} = \left\{ \eta_{\xi}^{\Theta_1}(\xi_1), \eta_{\xi}^{\Theta_2}(\xi_2) \dots \right\}^{-\Theta} \otimes \left\{ \eta_{\chi}^{\Theta_1}(\chi_1), \eta_{\chi}^{\Theta_2}(\chi_2) \dots \right\}^{-\Theta}.$$

The system of partial differential equations fixed for the heat wave model is transformed into a wavelet transform formula for finite elements using a trial function. The requirement of two-order continuity of β , namely the $\Delta\beta$ component, complicates the choice of the trial function in the wavelet transform. Therefore, the weak form is usually used. By writing the characteristic equation with the trial function ϑ and integrating it by parts over the region of interest Ω , we get

$$\int_{\Omega} \beta_{\gamma\gamma} d\Theta + 2 \int_{\Omega} \beta_{\gamma} d\Theta + \int_{\Omega} \nabla \mathcal{N} \beta d\Omega = \int_{\Omega} \mathcal{G} (2\psi_{\gamma} + \psi_{\gamma}) d\Omega.$$

The weak form of the heat wave propagation model can be obtained in matrix form based on Hamilton's principle, namely



$$P\beta_{\gamma\gamma} + Y\beta_{\gamma} + U\beta = W,$$

where the matrices included in this equation can be defined as follows

$$P = \sum_e \sum_i \sum_j^{n+1} \omega_i \omega_j S^T S \det(J), \quad Y = \sum_e \sum_i \sum_j^{n+1} 2\omega_i \omega_j S^T S \det(J),$$

$$U = \sum_e \sum_i \sum_j^{n+1} \omega_i \omega_j \nabla S^T \nabla S \det(J), \quad P = \sum_e \sum_i \sum_j^{n+1} \omega_i \omega_j S^T (2\psi + \psi_{\gamma}) \det(J),$$

where e is the symbol that defines the total number of finite elements used in the simulation; i and j are the element indices that correspond to different directions in the two-dimensional medium; ω_i and ω_j are the corresponding weights of the Gaussian integrations; J is the Jacobian matrix.

The methodology for calculating the reduced matrix parameters refers to the basic theory of the finite element method. The methodology for calculating the reduced matrix parameters refers to the basic theory of the finite element method. The structure of the equation containing the matrix parameters is the same as that of a typical wave propagation equation or dynamic reactions in elastic interactions. Based on these assumptions, it can be stated that the temperature change propagates in a wave-like mode.

The same weak form process for the heat wave propagation model is used to construct the corresponding weak form for the double phase delay model, where P, Y, Z, U and W are defined by the following relation

$$P\beta_{\gamma\gamma} + (Y + Z)\beta_{\gamma} + U\beta = W.$$

The matrix Z , which defines the damping parameters, is essentially the key element that contains the difference between the double phase delay model and the model of body wave propagation in a two-dimensional medium. The relaxation time ratio $\gamma_2 = \tau_{\ominus} / \tau_0 \gamma_2$ determines the properties of Z , matrix in double phase delay model

$$Z = \gamma_2 \sum_e \sum_i \sum_j^{n+1} \omega_i \omega_j \nabla S^T \nabla S \det(J) = \gamma_1 U.$$

The equations for W and Z represent the basic formulation of the solution of wavelet transforms for the heat wave model and the double phase delay model. However, numerical experiments have shown that these basic formulations are only suitable for calculations that rely on a computational grid with small cells. As a result, this places a strong limitation on the number of degrees of freedom.

The mode superposition scheme and the central time difference integration scheme are well suited for solving the systems of equations of the double phase delay model. These schemes, however, are limited in the case of small degrees of freedom. To analyze this problem, a 1000-degree-of-freedom structure could be considered. Weak forms can be used to obtain matrices P, Y, Z and U of size 1000×1000 and a vector W of size 1000×1 . After this, the superposition of modes can be performed. In general, for the inverse matrix of 1000×1000 , the improved numerical method of Lankoz should be used. It should be noted that for the problem of heat wave propagation, direct time iteration, namely, the scheme of integration over the central difference time, is more effective. Let us write the basic equations for the propagation of a heat wave in accordance with the central difference time integration scheme:

$$P \left(\frac{\beta_{\gamma+\Delta\gamma} - 2\beta_{\gamma} + \beta_{\gamma-\Delta\gamma}}{\Delta\gamma^2} \right) + Y \left(\frac{\beta_{\gamma+\Delta\gamma} - \beta_{\gamma-\Delta\gamma}}{2\Delta\gamma} \right) + U\beta_{\gamma} = W\beta_{\gamma},$$



$$\left(\frac{1}{\Delta\gamma^2} P + \frac{1}{2\Delta\gamma} Y \right) \beta_{\gamma+\Delta\gamma} = W \beta_{\gamma} - U \beta_{\gamma} + \left(\frac{2}{\Delta\gamma^2} P \right) \beta_{\gamma} - \left(\frac{1}{\Delta\gamma^2} P - \frac{1}{2\Delta\gamma} Y \right) \beta_{\gamma-\Delta\gamma},$$

where $\Delta\gamma$ is the step between the neighbor integration slice in time domain.

Accordingly, for the dual phase delay method the last equation should be modified using the following substitutions

$$\frac{1}{\Delta\gamma^2} P + \frac{1}{2\Delta\gamma} Y \rightarrow \frac{1}{\Delta\gamma^2} P + \frac{1}{2\Delta\gamma} Y + \frac{\gamma_2}{2\Delta\gamma} U, \quad \frac{1}{\Delta\gamma^2} P - \frac{1}{2\Delta\gamma} Y \rightarrow \frac{1}{\Delta\gamma^2} P - \frac{1}{2\Delta\gamma} Y - \frac{\gamma_1}{2\Delta\gamma} U.$$

For the analysis of heat wave propagation, it is important to fix both the boundary and initial conditions. Thermal boundary conditions can be divided into three types: the Dirichlet condition for temperatures of some regions (condition 1); the Neumann condition for heat flows; (condition 2); a mixture of the first and second boundary conditions (condition 3).

It is worth noting that the exact definition of the boundary condition of the second type in the given calculation algorithm is impossible. The reason for this statement is that the heat flux in non-Fourier problems is not directly proportional to the temperature gradient, especially in heterogeneous materials or for low-temperature phenomena. Implicit calculation scheme, allows to describe experimental results beyond Fourier. In this technique, the initial condition constraint is to set the initial value to β_{-1} and β_0 , and thus the initial value of temperature and heat flux can be controlled. Of course, a higher-order modification of the first and second derivatives of temperature can be considered in the calculation scheme. But such a calculation technique is not accurate enough. For this reason, the heat flux is usually considered as an independent state variable in the calculations.

Conditional stability is a drawback of the central difference method. This stability can be formulated as a requirement that the time step length $\Delta\gamma$ be less than some critical value γ_{cr} closely related to the dynamic properties of the discretized system

$$\Delta\gamma \leq \Delta\gamma_{cr} = 2 / \omega_n,$$

where ω_n – is the shortest period of eigenvalue of the discrete system.

4 RESEARCH RESULTS

Model calculations for the case of heat wave propagation assumed the use of the boundary condition of the second type. In particular, the heat flux through local boundary surfaces was zero. For the one-dimensional case, the boundary is set at the two ends of the domain. The Neumann boundary in the case of a two-dimensional medium was limited by the lateral surfaces. For both the one-dimensional and two-dimensional cases, an initial condition is used for which the initial changes in temperature and heat flux were negligible.

The calculation of the physical parameters of heat transfer before the non-dimensionalization procedure was performed for the following characteristic values. Thermal and kinematic parameters: $\alpha = 0,23 \cdot 10^{-4} m^2 / s$, $\tau_0 = 0,172 ps$. Geometrical characteristics: $x = 5 mn$ (equivalent to 1.257 in the dimensionless domain) for the 1D case, radius $r = 6 nm$ (equivalent to 1.508 in the dimensionless domain) for the 2D case. Energy characteristics: excitation parameter, $\tau_p = 100 fs$ (equivalent to $\gamma_1 = 0,29$), the reflectivity of the irradiated surface is simply assumed to be $R=0$. Spatial and temporal computational grid characteristics: for the one-dimensional case, $t = 3 ps$ (equivalent to $\gamma = 8,72$), divided into 10,000 time steps; for the two-dimensional case, $t = 1,5 ps$ (equivalent to $\gamma = 4,3604$), divided into 10,000 time steps.

Temperature changes at the excited point ($X_0 = 0$), the middle of the medium ($X_1 = 0,657$) and at the end of the one-dimensional region ($X_2 = 1,293$) were calculated using the thermal wave propagation and double phase delay methods. Tables 1-3 illustrate the calculated dependencies $\eta = \eta(\gamma)$ obtained using wavelet transforms for cases C1 – C6 ($\gamma_1 = 0; 0,1; 0,4; 0,8; 1,2; \text{ and } 1.5$, respectively).

Table 1

Wavelet performances for different γ_1 (point X_0)

γ	η					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
0	0	0	0	0	0	0
0.5	1.104	1.259	1.340	1.365	1.418	1.468
1	0.712	0.867	0.939	0.984	1.021	1.077
1.5	0.562	0.717	0.794	0.830	0.870	0.921
2.0	0.482	0.641	0.710	0.752	0.787	0.838
2.5	0.401	0.554	0.622	0.663	0.717	0.763
3.0	0.367	0.526	0.603	0.628	0.675	0.736
3.5	0.322	0.476	0.542	0.592	0.626	0.675
4.0	0.295	0.459	0.535	0.568	0.604	0.648
4.5	0.241	0.409	0.470	0.503	0.547	0.602
5.0	0.237	0.399	0.473	0.514	0.547	0.590
5.5	0.230	0.394	0.466	0.491	0.546	0.599
6.0	0.228	0.390	0.452	0.506	0.548	0.580
6.5	0.221	0.387	0.451	0.488	0.523	0.574
7.0	0.216	0.373	0.437	0.496	0.528	0.575
7.5	0.214	0.372	0.446	0.484	0.518	0.569
8.0	0.211	0.371	0.445	0.478	0.530	0.569

Table 2

Wavelet performances for different γ_1 (point X_1)

γ	η					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
0	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0	0.026	0.031
1	0	0	0.042	0.050	0.054	0.058
1.5	0.081	0.110	0.253	0.293	0.405	0.471
2.0	0.342	0.264	0.407	0.454	0.554	0.631
2.5	0.275	0.252	0.390	0.441	0.538	0.611
3.0	0.264	0.247	0.390	0.432	0.531	0.605
3.5	0.253	0.245	0.381	0.432	0.543	0.607
4.0	0.258	0.241	0.386	0.429	0.533	0.602
4.5	0.256	0.237	0.377	0.423	0.526	0.598
5.0	0.252	0.235	0.368	0.423	0.527	0.596
5.5	0.250	0.232	0.376	0.418	0.529	0.581
6.0	0.248	0.230	0.375	0.422	0.528	0.572
6.5	0.241	0.228	0.364	0.421	0.511	0.566
7.0	0.239	0.226	0.357	0.417	0.509	0.564
7.5	0.236	0.224	0.361	0.413	0.507	0.560
8.0	0.233	0.221	0.366	0.403	0.501	0.558

Table 3

Wavelet performances for different γ_1 (point X_2)

γ	η					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
0	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0	0	0.020
1	0	0	0	0	0.021	0.044
1.5	0	0	0.022	0.034	0.063	0.085
2.0	0	0	0.036	0.082	0.127	0.234
2.5	0.032	0.083	0.133	0.251	0.337	0.399
3.0	0.226	0.187	0.238	0.338	0.447	0.502
3.5	0.241	0.236	0.301	0.399	0.495	0.540
4.0	0.252	0.261	0.313	0.427	0.515	0.564
4.5	0.260	0.270	0.340	0.438	0.531	0.583
5.0	0.262	0.272	0.334	0.442	0.528	0.586
5.5	0.260	0.273	0.337	0.441	0.537	0.592
6.0	0.258	0.271	0.327	0.426	0.541	0.596
6.5	0.256	0.268	0.323	0.429	0.523	0.598
7.0	0.254	0.265	0.329	0.416	0.518	0.602
7.5	0.253	0.264	0.321	0.433	0.527	0.604
8.0	0.252	0.263	0.326	0.413	0.519	0.606

5 DISCUSSION OF RESEARCH RESULTS

The calculation results indicate a shift of the extreme values of η relative to $X = 0$ to the region of large values γ . In addition, the increase in dispersion near the maximum $\eta = \eta(\gamma)$ is smeared with increasing γ_2 . The diffusive behavior becomes more dominant. The tendency for the dispersion to increase becomes more and more pronounced for the responses at $X = X_1$ and $X = X_2$. At the midpoint ($X \approx X_{\max} / 2$) the responses for $\gamma_2 = 0$ exhibit typical wave behavior similar to an elastic wave, and the wave arrival time is instinctively close to $\gamma = 1,25$. The propagation pattern of the thermal wave corresponds to the existence of two regimes for the diffusion ($\gamma_2 = 0,5$) and superdiffusion cases ($\gamma_2 = 1,5$). For these regimes, the time for the wave to completely pass through the sample is calculated with a large error, since the thermal behavior is not wave-like. Comparison of the responses at $X = 0,6283$ with $X = 1,257$ allows us to state that the temperature disturbance arrives at almost the same time for these two positions. Consequently, the speed of the heat wave is large enough for the diffusion and superdiffusion cases.

The changes in the temperature distribution in the computational domain have a clearly expressed wave-like character. In this case, the pulsed thermal disturbance propagates in the wave form. The value $\gamma = 2,16$ corresponds to a clear circular wave front, on which the energy of the pulsed thermal disturbance is mainly concentrated. With increasing dimensionless time ($\gamma = 4,38$), the thermal energy is slowly absorbed by the medium.

Due to the increase of γ_2 , the matrix Z plays a more important role in the damping term. As a consequence, the temperature changes in the region after the wave front become sharper compared to the wave-like behavior. When $\gamma_2 = 0,5$, all wave-like features disappear, the disturbance caused by the pulse is completely transferred by diffusion. The wave front shape is smoothed out and the characteristic temperature in this case is always the hot spot.

Increasing γ_2 to 1.5 is the reason for the occurrence of the super-diffusion regime. Compared with normal diffusion, this value provides a higher diffusion rate at an early stage.

6 CONCLUSIONS

In this paper, an improved formulation of finite difference wavelet transforms is developed to perform numerical experiments to describe the thermal characteristics in one-dimensional and two-dimensional media. The simultaneous use of the central difference scheme in time and the wavelet interpolation technique for spatial coordinates allowed us to develop a hyperbolic model of thermal conductivity in two-dimensional structures. In order to verify the calculations, the proposed algorithm was tested by comparing with classical finite difference and spectral finite difference methods. The comparison was made taking into account the parameters of accuracy and efficiency.

For the case of 2D media, different mesh geometries were tested for different types of boundary conditions. The improved methods of describing thermal wave propagation and double phase delay can be considered as an alternative tool for thermal analysis. It should be noted that the use of the heat flux boundary condition in this calculation method requires further development due to the accumulation of calculation errors of the finite difference method. The wavelet-transforms of the state variable expressed in terms of finite differences can provide a solution to this problem.

7 ETHICAL DECLARATIONS

The author have no relevant financial or non-financial interests to report.

References

1. Monde M. Analytical method in inverse heat transfer problem using Laplace transform technique. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2000. 43(21). P. 3965–3975. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00040-5](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00040-5)
2. Mortazavi M., and Moghaddam S. Laplace transform solution of conjugate heat and mass transfer in falling film absorption process. *International Journal of Refrigeration*. 2016. 66. P. 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.02.013>
3. Coluci V.R., Andrijauskas F., and Dantas S.O. Modeling thermal conductivity with Green's function molecular dynamics simulations. *Modeling, Characterization, and Production of Nanomaterials (Second Edition)*. 2023. P. 171–187. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819905-3.00008-7>.
4. Wang J.S., Wang J., and Zeng N. Nonequilibrium Green's function approach to mesoscopic thermal transport. *Physical Review B – Condensed Matter and Material Physics*. 2006. 74(3). P. 033408
5. Feng W. Z., Gao X. W. An interface integral equation method for solving transient heat conduction in multi-medium materials with variable thermal properties. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. 98. P. 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.086>
6. Liu C. S., Chang C. W., Chiang C. Y. A regularized integral equation method for the inverse geometry heat conduction problem. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. 51(21-22). P. 5380-5388. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.043>
7. Wang H., Dai W., Melnik R. A finite difference method for studying thermal deformation in a double-layered thin film exposed to ultrashort pulsed lasers. *International journal of thermal sciences*. 2006. 45(12). P. 1179–1196. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.03.001>
8. Zhao D. et al. Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials. *Journal of Electronic Packaging*. 2016. 138(4). P. 040802. <https://doi.org/10.101115/1.4034605>

9. Palwasha Z. et al. Study of two-dimensional boundary layer thin film fluid flow with variable thermo-physical properties in three dimensions' space. *AIP Advances*. 2018. 8(10). P. 105318. <https://doi.org/10.1063/1.5053808>
10. Wang Z. et al. BEM/FDM conjugate heat transfer analysis of a two-dimensional air-cooled turbine blade boundary layer. *Journal of Thermal Science*. 2008. 17. P. 199–206. <https://doi.org/10.1007/s11630-008-0199-2>
11. Deng D., Jiang Y., Liang D. High-order finite difference methods for a second order dual-phase-lagging models of microscale heat transfer. *Applied Mathematics and Computation*. 2017. 309. P. 31–48. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.03.035>
12. Kazeminejad H. Numerical analysis of two dimensional parallel flow flat-plate solar collector. *Renewable energy*. 2002. 26(2). P. 309–323. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00121-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00121-5)
13. Han P., Tang D. W., Zhou L. P. Numerical analysis of two-dimensional lagging thermal behavior under short-pulse-laser heating on surface. *International journal of engineering science*. 2006. 44(20). P. 1510–1519. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2006.08.012>
14. Chan H. F., Fan C. M., Kuo C. W. Generalized finite difference method for solving two-dimensional non-linear obstacle problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2013. 37(9). P. 1189–1196. <https://doi.org/10.1016/jenganabound.2013.05.004>
15. Zapata M. U., Balam R. I. High-order implicit finite difference schemes for the two-dimensional Poisson equation. *Applied Mathematics and Computation*. 2017. 309. P. 222-244. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.04.006>
16. Huang Y. C., Lei S. L. Fast solvers for finite difference scheme of two-dimensional time-space fractional differential equations. *Numerical Algorithms*. 2020. 84(1). P. 37–62. <https://doi.org/10.1007/s11075-019-00742-6>
17. Visbal M. R., Gaitonde D. V. On the use of higher-order finite-difference schemes on curvilinear and deforming meshes. *Journal of Computational Physics*. 2002. 181(1). P. 155–185. <https://doi.org/10.1006/jcph.2002.7117>
18. Wang B. L., Han J. C., Sun Y. G. A finite element/finite difference scheme for the non-classical heat conduction and associated thermal stresses. *Finite elements in analysis and design*. 2012. 50. P. 201–206. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2011.09.010>

Література

1. Monde M. (2000) Analytical method in inverse heat transfer problem using Laplace transform technique. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 43(21). 3965–3975.
2. Mortazavi M., and Moghaddam S. (2016) Laplace transform solution of conjugate heat and mass transfer in falling film absorption process. *International Journal of Refrigeration*. 66. 93–104.
3. Coluci V.R., Andrijauskas F., and Dantas S.O. (2023) Modeling thermal conductivity with Green's function molecular dynamics simulations. *Modeling, Characterization, and Production of Nanomaterials (Second Edition)*. 171–187.
4. Wang J.S., Wang J., and Zeng N. (2006) Nonequilibrium Green's function approach to mesoscopic thermal transport. *Physical Review B – Condensed Matter and Material Physics*. 74(3). 033408.
5. Feng W. Z., Gao X. W. (2016) An interface integral equation method for solving transient heat conduction in multi-medium materials with variable thermal properties. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 98. 227–239.
6. Liu C. S., Chang C. W., Chiang C. Y. (2008) A regularized integral equation method for the inverse geometry heat conduction problem. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 51(21-22). 5380-5388.
7. Wang H., Dai W., Melnik R. (2006) A finite difference method for studying thermal deformation in a double-layered thin film exposed to ultrashort pulsed lasers. *International journal of thermal sciences*. 45(12). 1179–1196.
8. Zhao D. et al. (2016) Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials. *Journal of Electronic Packaging*. 138(4). 040802.
9. Palwasha Z. et al. (2018) Study of two-dimensional boundary layer thin film fluid flow with variable thermo-physical properties in three dimensions' space. *AIP Advances*. 8(10). 105318.

10. Wang Z. et al. (2008) BEM/FDM conjugate heat transfer analysis of a two-dimensional air-cooled turbine blade boundary layer. *Journal of Thermal Science*. 17. 199–206.
11. Deng D., Jiang Y., Liang D. (2017) High-order finite difference methods for a second order dual-phase-lagging models of microscale heat transfer. *Applied Mathematics and Computation*. 2017. 309. 31–48.
12. Kazeminejad H. (2002) Numerical analysis of two dimensional parallel flow flat-plate solar collector. *Renewable energy*. 26(2). 309–323.
13. Han P., Tang D. W., Zhou L. P. (2006) Numerical analysis of two-dimensional lagging thermal behavior under short-pulse-laser heating on surface. *International journal of engineering science*. 44(20). 1510–1519.
14. Chan H. F., Fan C. M., Kuo C. W. (2013) Generalized finite difference method for solving two-dimensional non-linear obstacle problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 37(9). P. 1189–1196.
15. Zapata M. U., Balam R. I. (2017) High-order implicit finite difference schemes for the two-dimensional Poisson equation. *Applied Mathematics and Computation*. 309. 222-244.
16. Huang Y. C., Lei S. L. (2020) Fast solvers for finite difference scheme of two-dimensional time-space fractional differential equations. *Numerical Algorithms*. 84(1). 37–62.
17. Visbal M. R., Gaitonde D. V. (2002) On the use of higher-order finite-difference schemes on curvilinear and deforming meshes. *Journal of Computational Physics*. 181(1). 155–185.
18. Wang B. L., Han J. C., Sun Y. G. (2012) A finite element/finite difference scheme for the non-classical heat conduction and associated thermal stresses. *Finite elements in analysis and design*. 50. 201–206.

Olexander Pysarenko

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture
Ph.D., Associate Professor
Didrihsona str., 4, Odesa, Ukraine, 65029
pysarenkoan@gmail.com,
ORCID: 0000-0001-5938-4107

For references:

O. Pysarenko. (2025). Non-Fourier heat conduction in two-dimensional media. *Mechanics and Mathematical Methods*. VII (1). 90 –102.

Для посилань:

Писаренко О. М. Теплопровідність не-Фур'є типу у двовимірних середовищах. *Механіка та математичні методи*, 2025. Т. VII. №. 1. С. 90-102..

УДК 004.8:519.7

МЕТОДИ ОБРОБКИ ВЕЛИКИХ ДАНИХ І ПРОГНОЗУВАННЯ ТИМЧАСОВИХ РЯДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Клименко О. В.¹, Сухомлинова О. В.², Кравченко В. В.²

¹TEAM International

²Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Анотація: У статті детально розглянуто особливості функціонування нейронних мереж у контексті їх застосування для обробки великих обсягів даних і прогнозування тимчасових рядів, приділяючи особливу увагу механізмам накопичення інтелектуального капіталу. Встановлено, що ключовою характеристикою таких нейронних мереж є їхня здатність до адаптивного налаштування вагових коефіцієнтів і взаємозв'язків між нейронами, що досягається завдяки використанню принципів самоорганізації. У статті проведено аналіз моделей нейронних мереж, зокрема мережі Хопфілда та Хеммінга, які орієнтовані на збереження еталонних зразків за рахунок попередньої ініціалізації, але демонструють обмежену гнучкість у змінюваних середовищах. Доведено, що мережі, архітектура яких побудована на основі принципу мінімізації відстані Хеммінга, ефективно виконують завдання класифікації двійкових вхідних даних та ідентифікації зразків із найменшою відстанню до поданого сигналу. Разом з тим, зазначено, що обмеження в обчислювальних ресурсах та відсутність зворотного зв'язку з базою знань можуть спричинити певну нестабільність у роботі таких мереж. У статті запропоновано метод оптимізації структури нейронних мереж, що передбачає заміну окремих шарів на матриці вагових коефіцієнтів, що дає змогу знизити обчислювальну складність без втрати точності отримуваних результатів. Оцінено ефективність нейронних мереж у контексті аналізу великих масивів тимчасових рядів, зокрема у випадках, коли дані характеризуються високою динамічністю та складними нелінійними залежностями. У статті розроблено рекомендації для створення нейронних мереж із покращеними показниками стабільності та пластичності, які здатні зберігати сформовані знання навіть у випадках впливу зовнішніх сигналів. Описано підхід, згідно з яким процес обробки інформації базується на активації короткочасної пам'яті, функціонуванні системи уваги та використанні довготривалих зв'язків, що сприяє точнішій ідентифікації класів даних.

Ключові слова: обробка великих даних, прогнозування тимчасових рядів, нейронні мережі, машинне навчання, аналіз даних, активаційні функції.

METHODS OF PROCESSING BIG DATA AND FORECASTING TIME SERIES USING NEURAL NETWORKS

O. Klymenko¹, O. Sukhomlynova², V. Kravchenko²

¹TEAM International

²Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology

Abstract: The article examines in detail the features of the functioning of neural networks in the context of their application for processing large amounts of data and forecasting time series, paying special attention to the mechanisms of accumulation of intellectual capital. It is established that the key characteristic of such neural networks is their ability to adaptively adjust weight coefficients and interconnections between neurons, which is achieved through the use of self-organization principles. The article analyzes neural network models, in particular Hopfield and Hamming networks, which are focused on preserving reference samples through preliminary initialization, but demonstrate limited flexibility in changing environments. It is proven that networks, the architecture of which is built on the principle of minimizing the Hamming distance, effectively perform the tasks of classifying binary



input data and identifying samples with the smallest distance to the given signal. At the same time, it is noted that limitations in computing resources and the lack of feedback with the knowledge base can cause a certain instability in the operation of such networks. The article proposes a method for optimizing the structure of neural networks, which involves replacing individual layers with matrices of weight coefficients, which makes it possible to reduce the computational complexity without losing the accuracy of the obtained results. The effectiveness of neural networks is assessed in the context of analyzing large arrays of time series, in particular in cases where the data are characterized by high dynamics and complex nonlinear dependencies. The article develops recommendations for creating neural networks with improved stability and plasticity indicators, which are able to preserve the formed knowledge even in cases of influence of external signals. An approach is described according to which the information processing process is based on the activation of short-term memory, the functioning of the attention system and the use of long-term connections, which contributes to a more accurate identification of data classes.

Keywords: big data processing, time series forecasting, neural networks, machine learning, data analysis, activation functions.

1 ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій та цифрової трансформації, обробка великих обсягів даних стає критично важливою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у різних сферах діяльності, зокрема в економіці, фінансах, медицині, енергетиці, та інших галузях. Великі дані містять характерний потенціал для аналізу складних систем, прогнозування змін та оптимізації процесів. Однак традиційні методи обробки даних часто виявляються недостатньо ефективними через високий рівень складності, динамічності та багатовимірності цих даних. Провідне значення набувають дослідження методів прогнозування часових рядів, оскільки аналіз трендів, циклічності та інших характеристик є основою для побудови прогнозів у різних сферах, таких як фінансовий ринок, енергетика, кліматологія тощо. І відповідно в обґрунтованому контексті нейронні мережі демонструють свою ефективність завдяки здатності виявляти нелінійні залежності, адаптуватися до динамічних змін і працювати з великими масивами даних. Незважаючи на прогрес у дослідженні методів машинного навчання та нейронних мереж, існують виклики, пов'язані з оптимізацією архітектури нейронних мереж, мінімізацією помилок прогнозування, а також забезпеченням високої швидкості обробки даних за умов обмежених ресурсів.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У ряді сучасних наукових робіт висвітлюється питання стосовно потенціалу нейронних мереж для вирішення задач, що вимагають аналізу великих обсягів даних із високою динамічністю та складними нелінійними залежностями. У роботах Дзямучич М., Шматковська Т., Борисюк О. [1], Шакір А., Стегеманн Д., Волк М., Джамоус Н., Туровські К. [13] детально розглянуто базові методи обробки великих даних і алгоритми машинного навчання, що лежать в основі нейронних мереж. Автори вказують на здатність штучних нейронних мереж виявляти приховані закономірності у великих наборах даних, що є ключовим для прогнозування тимчасових рядів. У подальших дослідженнях Інкін О., Погорелов О. [7] акцентовано увагу на застосуванні рекурентних нейронних мереж і довготривалої короткочасної пам'яті для прогнозування тимчасових рядів, таких як фінансові показники, погодні умови та енергетичні витрати.

У сучасних дослідженнях Чжан Л., Ван Р., Ліз., Лі Дж. [16] розглянуто питання оптимізації архітектури нейронних мереж для підвищення їхньої точності та ефективності при роботі з великими даними. Крім того, дослідження Хевамаладж Х., Бергмейр К., Бандара К. [5], Тілаб А. [12] акцентують увагу на використанні згорткових нейронних мереж (CNN) для комбінованого аналізу часових рядів і просторових даних, що дозволяє досягати високої точності прогнозування. Автори зазначають, що якісна підготовка даних значно впливає на точність прогнозування тимчасових рядів. У статті від Чжан М., Чень Й. [15], висвітлено проблему масштабування обчислювальних ресурсів для навчання нейронних мереж у задачах великих даних. Запропоновані рішення включають використання розподілених обчислень, хмарних платформ та оптимізованих алгоритмів, що дозволяють знизити витрати часу та ресурсів.

Ми можемо констатувати, що огляд сучасної бази дослідження свідчить про провідну роль нейронних мереж у задачах обробки великих даних і прогнозування тимчасових рядів, однак питання оптимізації архітектури, зниження обчислювальної складності та адаптації до змінюваних середовищ залишаються актуальними й потребують подальшого дослідження.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті визначено розробку ефективних інструментів обробки великих даних і прогнозування тимчасових рядів, заснованих на нейронних мережах. Завдання дослідження: а) дослідити особливості функціонування моделей нейронних мереж, таких як мережі Хопфілда та Хеммінга, для аналізу великих даних і прогнозування тимчасових рядів; б) обґрунтувати доцільність удосконалення моделей нейронних мереж шляхом розробки нових архітектур, які дозволяють забезпечити баланс між стабільністю і пластичністю в процесі роботи з великими масивами даних; в) запропонувати алгоритм інтеграції механізмів довготривалої пам'яті та зворотного зв'язку для підвищення гнучкості нейронних мереж у задачах прогнозування тимчасових рядів.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Процес навчання нейронної мережі, який ґрунтується на принципі накопичення і прогнозування, передбачає використання вибірки, що складається з численних пар вхідних і вихідних векторів, які тісно пов'язані між собою. Важливою особливістю алгоритму такого типу є механізм самоорганізації, за допомогою якого здійснюється адаптація вагових коефіцієнтів і зв'язків між нейронами. Однак існують специфічні моделі нейронних мереж, у яких концепцію накопичення інтелектуального капіталу не можна розглядати як просте додавання навичок або досвіду. У подібних мережах вагові коефіцієнти синапсів обчислюються лише один раз на початковому етапі налаштування, ґрунтуючись на характеристиках даних, що обробляються. Після цього процес накопичення даних мережі зводиться виключно до початкового розрахунку. Такі нейронні мережі, як-от мережа Хопфілда та мережа Хеммінга, зберігають зразки ще до подачі реальних даних на їхній вхід і не мають здатності до адаптації або зміни своїх параметрів після цього етапу.

Мережі цього типу мають обмежений спектр можливостей, адже, незважаючи на можливість використовувати апріорні знання, вони не здатні адаптуватися до нових даних, оскільки позбавлені зворотного зв'язку з інтелектуальним базисом. Мережі Хопфілда та Хеммінга, завдяки своїй структурі добре вписуються в концепції організації спільної діяльності. Мережа Хопфілда, зокрема, складається з єдиного шару нейронів, кількість яких одночасно відповідає кількості входів і виходів. Усі нейрони пов'язані між собою через синапси, що дозволяє кожному з них отримувати сигнали через вхідний синапс і передавати їх далі через аксони (рис. 1.). Ці мережі, незважаючи на свої обмеження, займають важливе місце у дослідженні та розробці моделей для вирішення специфічних завдань, пов'язаних із аналізом великих даних і прогнозуванням тимчасових рядів [2].

Завдання, яке вирішується нейронною мережею в межах її функціонування як «моделі обробки великих даних і прогнозування тимчасових рядів», зазвичай формулюється таким чином: існує набір двійкових сигналів, що можуть бути представлені у вигляді зображень, оцифрованих звукових записів або інших даних, які характеризують певні об'єкти чи процеси, і які вважаються еталонними зразками [3, 8]. Основною метою мережі є здатність на основі неповного або спотвореного вхідного сигналу, поданого на її вхід, ідентифікувати відповідний еталонний зразок, якщо він присутній у пам'яті, або визначити, що вхідний сигнал не відповідає жодному із збережених зразків.

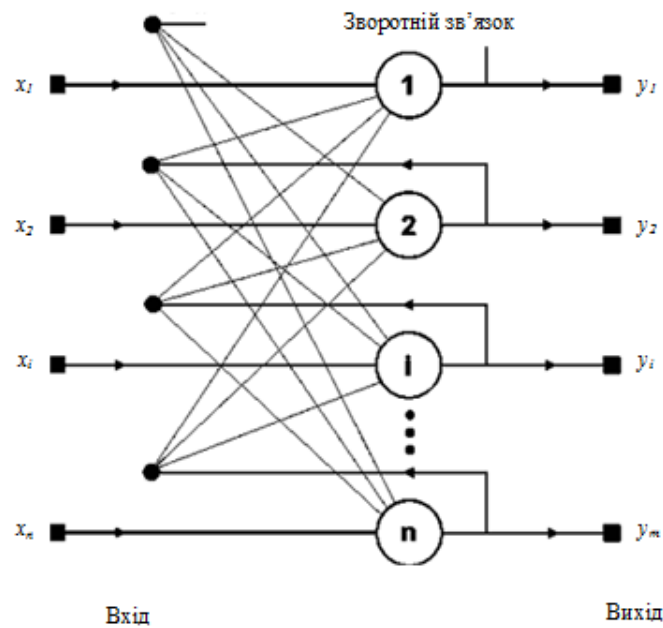


Рис. 1. Форматне структурування нейронної мережі Хопфілда для обробки великих даних і прогнозування тимчасових рядів

У загальному випадку будь-який сигнал, незалежно від його природи, може бути представлений у вигляді вектора, що відображає його основні характеристики та структуру. Для великих даних, таких як часові ряди, цей підхід дозволяє обробляти інформацію в компактній формі, забезпечуючи можливість її ефективного аналізу та використання для прогнозування. Нейронні мережі, які реалізують такі завдання, особливо актуальні у контексті обробки великих обсягів даних, де традиційні методи не завжди здатні справлятися з високою динамічністю та нелінійністю процесів. Це відкриває перспективи їх застосування для аналізу та прогнозування тимчасових рядів у сферах фінансів, медицини, енергетики та інших галузях, де точність і швидкість обробки інформації мають вирішальне значення [10].

Кожен елемент вхідного вектора x_i може мати значення або «+1», або «-1», що дозволяє описувати характеристики даних у чіткій двійковій формі. Вектор, який представляє i -й зразок, позначається як X_k , де його компоненти x_{ik} належать множині $k=0, \dots, m-1$, а m визначає загальну кількість зразків. У процесі роботи нейронна мережа, розпізнаючи або «згадуючи» конкретний зразок на основі поданих на вхід даних, формує на своїх виходах результат у вигляді точного відтворення цього зразка, тобто $Y=X_k$, де Y є вектором вихідних значень мережі.

$$X = \{ x_i : i = 0, \dots, n-1 \}, \tag{1}$$

n – кількість нейронів в мережі і розмірність вхідних і вихідних формуючих векторів.

Такий підхід має особливе значення в задачах обробки великих даних, коли необхідно працювати з великим масивом тимчасових рядів. Завдяки можливості точного визначення та відтворення характерних зразків, нейронні мережі забезпечують не лише класифікацію, але й прогнозування складних нелінійних залежностей. Вказана властивість є особливо корисною у випадках, коли необхідно виділити ключові тренди з великих масивів даних, таких як фінансові показники, метеорологічні спостереження або медичні дослідження, і використовувати їх для точного прогнозування майбутніх змін тимчасових рядів [4].

$$Y = \{ y_i : i = 0, \dots, n-1 \}. \quad (2)$$

Якщо вихідний вектор не збігається з жодним із зразкових, то мережа фактично не здатна розпізнати вхідний сигнал і створює результат, який не відповідає жодному із закладених шаблонів. Наприклад, якщо вхідні сигнали є графічними зображеннями, то дані, відтворені мережею на виході, можуть виглядати як чітке відображення одного із зразкових зображень (у разі успішного розпізнавання) або ж як неточна імпровізація, яка не має конкретного сенсу (у разі невдачі).

На етапі ініціалізації нейронної мережі налаштування вагових коефіцієнтів синапсів здійснюється за певними алгоритмами, які забезпечують початкове формування структури мережі, що формує мережі ефективно працювати з великими масивами даних і адаптуватися до завдань прогнозування тимчасових рядів. Такий підхід особливо важливий для задач, де точність і здатність мережі до розпізнавання складних патернів у великих обсягах даних є вирішальними, наприклад, у фінансовому аналізі, прогнозуванні погодних умов чи оцінці поведінки споживачів у маркетингу

$$w_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=0}^{m-1} x_i^k x_j^k, & i \neq j, \\ 0, & i = j. \end{cases} \quad (3)$$

У моделі під індексами i та j розуміють відповідно індекси пресинаптичного та постсинаптичного нейронів, які беруть участь у передачі сигналу. Значення x_i^k , відповідають i -му та j -му елементам вектора, що описує k -й зразок даних, який використовується в процесі обробки. Такий підхід дозволяє детально моделювати зв'язки між нейронами та їхню взаємодію в процесі навчання нейронної мережі, що є важливим у задачах прогнозування тимчасових рядів. Використання таких структурних елементів у контексті великих даних дає змогу мережі адаптуватися до складних патернів і виявляти взаємозв'язки між різними елементами даних, забезпечуючи ефективність аналізу та прогнозування [13].

Процес функціонування нейронної мережі відбувається за таким алгоритмом (де через p позначається номер ітерації), коли на вхід нейронної мережі подається невідомий сигнал, який потребує обробки та аналізу і сам сигнал вводиться шляхом безпосереднього встановлення відповідних значень аксонів, що представляють початкові вхідні дані для обчислень у мережі [10]. Запропонований підхід є ключовим для задач обробки великих даних, зокрема у випадках, коли необхідно аналізувати часові ряди. Вхідний сигнал може містити велику кількість інформації, що характеризує складні процеси, і правильна ініціалізація даних є основою для подальшої роботи мережі з виявлення закономірностей і побудови прогнозів

$$y_i(0) = x_i, i = 0, \dots, n-1. \quad (4)$$

Таким чином, позначення вхідних синапсів на схемі нейронної мережі носить умовний характер і слугує лише для спрощення візуального уявлення процесу. Нуль у дужках праворуч від y_i вказує на те, що це початковий, або нульовий, етап ітеративного циклу функціонування мережі. На наступному етапі виконується розрахунок нового стану кожного нейрона в мережі, що дозволяє оновлювати їхні значення відповідно до алгоритмів навчання та взаємодії між шарами. Цей процес є фундаментальним для роботи нейронних мереж у задачах обробки великих даних і прогнозування тимчасових рядів, адже саме через поступове оновлення станів нейронів мережа здатна моделювати складні закономірності, які приховані у великих обсягах інформації [12]. Такий підхід дозволяє забезпечити точність аналізу та адаптивність до динамічних змін даних

$$s_j(p+1) = \sum_{i=0}^{n-1} w_{ij} \times y_i(p) \quad j = 0, \dots, n-1, \quad (5)$$

і нові значення аксонів в мережі

$$y_i(p+1) = f[s_j(p+1)], \quad (6)$$

де f – активаційна функція у вигляді стрибка, наведена на рис. 1.

На наступному етапі перевіряється, чи змінилися вихідні значення аксонів порівняно з попередньою ітерацією. Якщо зміни відбулися, алгоритм повертається до другого пункту для подальшого оновлення станів нейронів. Якщо ж вихідні значення стабілізувалися, процес завершується, а сформований вихідний вектор вважається зразком, який найкраще відповідає вхідним даним.

Як зазначалося раніше, інколи нейронна мережа може не впоратися із завданням розпізнавання, видаючи на виході образ, який не має відповідника серед запам'ятованих зразків. Це обмеження пов'язане з ємністю мережі, яка для мережі Хопфілда обмежується кількістю зразків m , що не повинна перевищувати приблизно $0,15 - n$, де n – кількість нейронів. Крім того, якщо два зразки, наприклад, A і B , мають значну схожість, мережа може створювати перехресні асоціації. У такому випадку подання на вхід мережі вектора A може призводити до формування на виході вектора B , і навпаки [5].

Коли завдання не вимагає явного формування повного образу, а достатньо лише визначити ідентифікаційний номер зразка, для реалізації асоціативної пам'яті ефективно використовується мережа Хеммінга. Ця модель у порівнянні з мережею Хопфілда потребує менших обчислювальних ресурсів і пам'яті, що пояснюється її простою структурою. Мережа Хеммінга складається з двох шарів нейронів. У кожному шарі є m нейронів, де m відповідає кількості зразків (рис. 2.). Нейрони першого шару мають по n синапсів, що підключені до входів мережі, які утворюють так званий фіктивний нульовий шар. Нейрони другого шару пов'язані між собою інгібіторними, тобто негативними зворотними, синапсами, що обмежують взаємний вплив. Крім того, кожен нейрон має позитивний зворотний зв'язок через єдиний синапс, з'єднаний із власним аксоном [14].

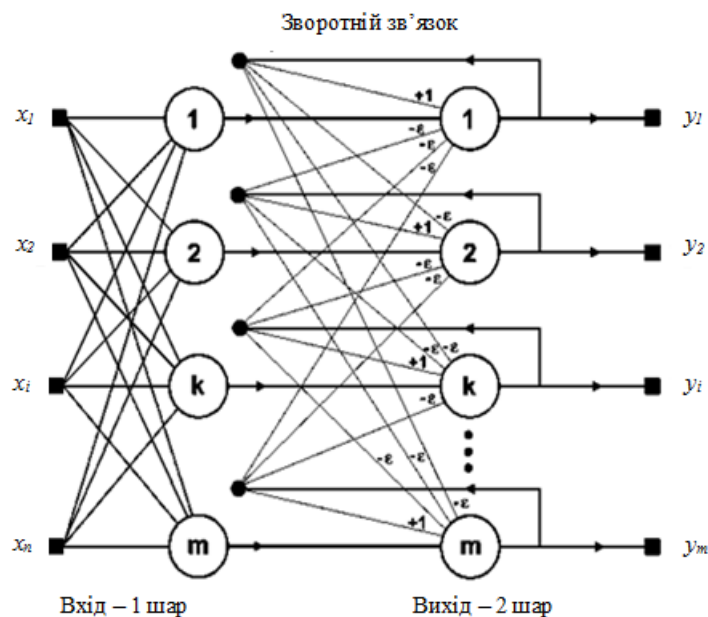


Рис. 2. Форматне структурування нейронної мережі Хеммінга для обробки великих даних і прогнозування тимчасових рядів



Завдяки своїй простоті та ефективності, мережа Хеммінга демонструє значний потенціал для роботи із задачами прогнозування часових рядів, де точне розпізнавання та класифікація є критично важливими для обробки великих обсягів даних.

Принцип роботи мережі Хеммінга полягає в обчисленні відстані Хеммінга між тестованим вхідним сигналом і кожним із зразкових образів, що зберігаються в пам'яті мережі. Відстань Хеммінга визначається як кількість розрядів (бітів), які відрізняються між двома бінарними векторами. Завдання мережі полягає у визначенні зразка, для якого ця відстань є мінімальною. У результаті цього процесу активується єдиний вихідний нейрон, що відповідає зразку з найменшою відстанню Хеммінга до поданого вхідного сигналу [6].

На етапі ініціалізації мережі відбувається налаштування вагових коефіцієнтів нейронів першого шару та порогових значень активаційної функції. Ці параметри визначаються згідно зі спеціальними алгоритмами, які забезпечують коректність і точність роботи мережі в процесі обробки даних. Такий підхід є надзвичайно ефективним для задач аналізу великих обсягів даних, особливо в контексті прогнозування тимчасових рядів. Мережа здатна швидко ідентифікувати ключові закономірності у вхідних даних, визначаючи найбільш релевантні зразки для подальшого аналізу, що робить її важливим інструментом для побудови моделей прогнозування в умовах складних і динамічних систем:

$$w_{ik} = \frac{x_i^k}{2} \quad i = 0, \dots, n-1, \quad k = 0, \dots, m-1, \quad (7)$$

де x_i^k – i -й елемент k -го зразка.

Вагові коефіцієнти інгібіторних (гальмівних) синапсів у другому шарі мережі Хеммінга задаються як деяке значення $0 < e < 1/m$, де m – кількість зразків. Водночас кожен нейрон у цьому шарі має позитивний синапс, пов'язаний із власним аксоном, який отримує вагу «+1».

Процес функціонування нейронної мережі Хеммінга відбувається за наступним алгоритмом: на вхід мережі подається невідомий вектор $X = \{x_i : i = 0, \dots, n-1\}$, де n – кількість компонент вектора. На основі цього вхідного сигналу виконуються обчислення станів нейронів першого шару, які представляють собою проміжні результати для подальшої обробки. У позначеннях індекси в дужках вказують на номер шару, до якого належать нейрони. Наведений алгоритм є основою роботи мережі Хеммінга, яка демонструє високу ефективність в обробці великих обсягів даних. Застосування цієї моделі особливо актуальне для задач прогнозування тимчасових рядів, адже вона дозволяє швидко ідентифікувати та класифікувати вхідні сигнали, забезпечуючи високу точність і швидкість обчислень, що є критичними у сучасних умовах аналізу даних.

$$s_j(p+1) = \sum_{i=0}^{n-1} w_{ij} y_i(p), \quad j = 0, \dots, n-1. \quad (8)$$

Після завершення розрахунків станів нейронів першого шару отримані значення використовуються для ініціалізації аксонів другого шару [9]. Цей процес забезпечує передачу обробленої інформації на наступний етап роботи мережі, що є важливим кроком у формуванні остаточних результатів.

Такий механізм передачі даних між шарами нейронної мережі дозволяє адаптуватися до специфіки вхідної інформації та забезпечувати точність обробки великих обсягів даних, особливо у випадках прогнозування тимчасових рядів. Завдяки

цьому мережа здатна моделювати складні залежності та виявляти ключові закономірності, які є основою для прийняття рішень або формування прогнозів.

$$y_j^{(2)} = y_j^{(1)}, j = 0, \dots, m-1. \quad (9)$$

2. Визначаються нові стани очікуваних нейронів другого шару

$$s_j^{(2)}(p+1) = y_j(p) - \varepsilon \sum_{k=0}^{m-1} y_k^{(2)}, k \neq j; o = 0, \dots, m-1, \quad (10)$$

і показники відповідних аксонів

$$y_j^{(2)}(p+1) = f[s_j^{(2)}(p+1)], j = 0, \dots, m-1. \quad (11)$$

Активаційна функція f у даній моделі має форму порогу, як показано на рис. 2., причому значення порогу F повинно бути достатньо великим, щоб уникнути насичення для будь-яких можливих значень аргументу. На наступному етапі алгоритму перевіряється, чи змінилися вихідні значення нейронів другого шару у порівнянні з попередньою ітерацією. Якщо зміни відбулися, алгоритм повертається до другого кроку для оновлення станів мережі. В іншому випадку процес завершується.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

З аналізу алгоритму видно, що роль першого шару носить умовний характер: значення вагових коефіцієнтів використовуються лише на першому кроці, після чого мережа більше до них не звертається. Це дозволяє замінити перший шар матрицею вагових коефіцієнтів без шкоди для функціональності. У реальних умовах, коли вхідні дані змінюються динамічно і мережа, ймовірно, ніколи не отримає однаковий вектор двічі, може виникнути ситуація, за якої ваги мережі постійно змінюються, не досягаючи стабільності. У таких випадках мережа втрачає здатність накопичувати інтелектуальний капітал або знання, що робить її роботу менш ефективною. Додатково існують приклади мереж, в яких навіть чотири циклічно подані вектори можуть викликати безперервні зміни ваг, що призводить до процесу, який не сходиться. Ця тимчасова нестабільність стала однією з ключових причин розробки альтернативних конфігурацій нейронних мереж, здатних забезпечувати стабільність у навчанні.

З метою розв'язання проблеми балансу між стабільністю та пластичністю, зв'язки, що йдуть зверху вниз, відіграють вирішальну роль. Вони дозволяють фокусувати увагу мережі та запобігати деградації пам'яті під впливом сторонніх сигналів. Процес обробки інформації починається з моменту, коли сенсорний вхід активує короткочасну пам'ять, систему уваги та орієнтації. Вхідний сигнал представлений у вигляді патерну активності в першому шарі короткочасної пам'яті. Поки цей патерн залишається подібним до вхідного, система орієнтації залишається неактивною через баланс між стимулюючим сигналом і гальмівними впливами короткочасної пам'яті.

Зв'язки, які йдуть від нижніх шарів до верхніх і зберігають довготривалу пам'ять у вигляді вагових коефіцієнтів, впливають на елементи другого шару. Ці елементи кодують класи, а їхня активація відбувається, коли патерн короткочасної пам'яті в першому шарі найбільшою мірою відповідає характеристикам класу, записаним у довготривалій пам'яті. Таким чином, мережа здатна ефективно класифікувати дані та забезпечувати високоточне прогнозування на основі великого обсягу тимчасових рядів.

6 ВИСНОВКИ

У ході дослідження було детально вивчено функціонування нейронних мереж, зокрема таких моделей, як мережа Хопфілда та мережа Хеммінга, які і відзначаються здатністю зберігати еталонні зразки шляхом попередньої ініціалізації, проте мають обмеження в адаптації до змінюваних умов через відсутність механізму зворотного зв'язку з базою знань. Оцінено, що використання принципу мінімізації відстані Хеммінга є ефективним для ідентифікації зразків, найбільш подібних до вхідного сигналу, особливо у двійкових даних. Разом із тим виявлено, що при високій подібності між зразками можливе виникнення перехресних асоціацій, що потребує додаткової оптимізації архітектури мережі для усунення таких явищ.

Обґрунтовано доцільність впровадження структурних змін у нейронних мережах, які дозволяють досягти балансу між їхньою стабільністю та пластичністю. Зокрема, було запропоновано замінити окремі шари мережі матрицями вагових коефіцієнтів, що забезпечує зниження обчислювальних витрат та підвищення ефективності без втрати точності отриманих результатів. Розроблено рекомендації для створення нейронних мереж із покращеною стабільністю, які зберігають накопичені знання та захищають пам'ять від зовнішніх впливів, що сприяє ефективності їх використання в умовах змінюваних середовищ. Запропоновано підхід до обробки інформації, який базується на активації короткочасної пам'яті, інтеграції системи уваги та використанні довготривалих зв'язків, що підвищує точність ідентифікації класів даних у задачах прогнозування тимчасових рядів і сприяє вдосконаленню моделей для аналізу великих обсягів інформації.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають будь-яких фінансових чи нефінансових інтересів щодо матеріалів, представлених у цій статті, які слід розкривати.

Література

1. Дзямулич М. І., Шматковська Т. О., Борисюк О. В. Великі дані та їх роль у формуванні цифрової економіки. *Галицький економічний вісник*. 2021. №70(3). С. 16-21.
2. Коротун Н. В. Сучасна модель інформаційного аналітика в умовах розвитку BigData в Україні. *Інформаційні технології і системи в документознавчій сфері*. 2024. С. 52-54.
3. Македон В. В., Маковецька А. О. Інформаційне забезпечення економічної безпеки підприємств в умовах ринкової нестабільності. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. Серія: "Економічні науки". 2023. №12. URL: <https://www.inter-nauka.com/issues/economic2023/12/9477>. <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2023-12-9477>.
4. Усата О. Ю., Іванов Д. Є. Великі дані та основи роботи з ними. *Актуальні питання сучасної інформатики*. 2024. №11. С. 57-59.
5. Hewamalage H., Bergmeir C., Bandara K. Recurrent Neural Networks for Time Series Forecasting: Current Status and Future Directions. *International Journal of Forecasting*. 2020. No 36(3). pp. 388–427. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2020.06.008>.
6. Huang Q., Zhou Z., Yang K., Lin G., Yi Z., Wang Y. LeRet: Language-Empowered Retentive Network for Time Series Forecasting. *Proceedings of the Thirty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence*. 2024. pp. 4165–4173. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2024/460>.
7. Inkin O.A., Pohorielov O.V. EEG simulation using deep neural networks. *System Technologies*. 2024. No 3. pp. 57–68. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-152-2024-06>.
8. Makedon V., Budko O., Salyga K., Myachin V., Fisunen N. Improving Strategic Planning and Ensuring the Development of Enterprises Based on Relational Strategies. *Theoretical And Practical Research In Economic Fields*. 2024. No 15(4). pp. 798-811. doi:10.14505/tpref.v15.4(32).02.

9. McAfee A., Brynjolfsson E. *Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future*. New York: W.W. Norton & Company, 2017. 340 p.
10. Pajak K., Omelyanenko V., Makedon V., Shevchenko V., Ovcharenko I. Raising the level of financial security of the enterprise based on the basic risks differentiation. *Journal of Security and Sustainability Issues*. 2020. No 10(1). pp. 115-130. [https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1\(9\)](https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1(9)).
11. Shelukhin M., Kupriichuk V., Kyrylko N., Makedon V., Chupryna N. Entrepreneurship Education with the Use of a Cloud-Oriented Educational Environment. *International Journal of Entrepreneurship*. 2021. Volume 25. Issue 6. URL: <https://www.abacademies.org/articles/entrepreneurship-education-with-the-use-of-a-cloudoriented-educational-environment-11980.html>.
12. Tealab A. Time Series Forecasting using Artificial Neural Networks Methodologies: A Systematic Review. *Future Computing and Informatics Journal*. 2018. No 3. pp. 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.fcij.2018.10.003>.
13. Shakir A., Staegemann D., Volk M., Jamous N., Turowski K. Towards a concept for building a big data architecture with microservices. *Business Information Systems*. 2021. pp. 83–94.
14. Valenzuela O., Rojas F., Herrera L. J., Pomares H., Rojas I. New Advances and Methodologies in the Field of Time Series and Forecasting ITISE-2024. *Engineering Proceedings*. 2024. Vol. 68(1). p. 67. <https://doi.org/10.3390/engproc2024068067>.
15. Zhang M., Chen Y. Link prediction based on graph neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 32nd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2018). Montréal, Canada, 2018.
16. Zhang L., Wang R., Li Z., Li J., Ge Y., Wa S., Huang S., Lv C. Time-Series Neural Network: A High-Accuracy Time-Series Forecasting Method Based on Kernel Filter and Time Attention. *Information*. 2023. Vol. 14(9). pp. 500. <https://doi.org/10.3390/info14090500>.

References

1. Dziamulich, M. I., Shmatkovska, T. O., Borysiuk, O. V. (2021). Velyki dani ta yikh rol u formuvanni tsyfrovoy ekonomiky [Big data and their role in the formation of the digital economy]. *Halytskyi ekonomichnyi visnyk*, 70(3), 16–21.
2. Korotun, N. V. (2024). Suchasna model informatsiynoho analityka v umovakh rozvytku BigData v Ukraini [Modern model of an information analyst in the context of BigData development in Ukraine]. *Informatsiini tekhnolohii i systemy v dokumentoznavchii sferi*, 2024, 52–54.
3. Makedon, V. V., Makovetska, A. O. (2023). Informatsiine zabezpechennia ekonomichnoi bezpeky pidpriemstv v umovakh rynkovoi nestabilnosti [Information support for economic security of enterprises under market instability]. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal "Internauka"*. Seriya: "Ekonomichni nauky", 12. URL: <https://www.inter-nauka.com/issues/economic2023/12/9477>. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2023-12-9477>. [in Ukrainian].
4. Usata, O. Yu., Ivanov, D. Ye. (2024). Velyki dani ta osnovy roboty z nymy [Big data and basics of working with them]. *Aktualni pytannia suchasnoi informatyky*, 11, 57–59.
5. Hewamalage, H., Bergmeir, C., & Bandara, K. (2020). Recurrent Neural Networks for Time Series Forecasting: Current Status and Future Directions. *International Journal of Forecasting*, 36(3), 388-427. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2020.06.008>.
6. Huang, Q., Zhou, Z., Yang, K., Lin, G., Yi, Z., & Wang, Y. (2024). LeRet: Language-Empowered Retentive Network for Time Series Forecasting. *Proceedings of the Thirty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 4165–4173. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2024/460>.
7. Inkin O.A., & Pohorielov O.V., (2024). EEG simulation using deep neural networks. *System technologies*. 3. 57-68. [10.34185/1562-9945-3-152-2024-06](https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-152-2024-06).
8. Makedon, V., Budko, O., Salyga, K., Myachin, V., & Fisunenko, N. (2024). Improving Strategic Planning and Ensuring the Development of Enterprises Based on Relational Strategies. *Theoretical And Practical Research In Economic Fields*, 15(4), 798-811. [doi:10.14505/tpref.v15.4\(32\).02](https://doi.org/10.14505/tpref.v15.4(32).02)
9. McAfee, A., & Brynjolfsson, E. (2017) *Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future*. New York: W.W. Norton & Company.

10. Pajak, K., Omelyanenko, V., Makedon, V., Shevchenko, V., Ovcharenko, I. (2020). "Raising the level of financial security of the enterprise based on the basic risks differentiation", Journal of Security and Sustainability Issues, №10 (1), 115-130. [https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1\(9\)](https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1(9)).
11. Shakir, A., Staegemann, D., Volk, M., Jamous, N., Turowski, K. (2021). "Towards a concept for building a big data architecture with microservices", Business Information Systems, pp. 83–94.
12. Shelukhin, M., Kupriichuk, V., Kyrylko, N., Makedon, V., Chupryna, N. (2021). Entrepreneurship Education with the Use of a Cloud-Oriented Educational Environment. International Journal of Entrepreneurship. Volume 25, Issue 6. URL: <https://www.abacademies.org/articles/entrepreneurship-education-with-the-use-of-a-cloudoriented-educational-environment-11980.html>.
13. Tealab, Ahmed. (2018). Time Series Forecasting using Artificial Neural Networks Methodologies: A Systematic Review. Future Computing and Informatics Journal. 3. 10.1016/j.fcij.2018.10.003.
14. Valenzuela, O., Rojas, F., Herrera, L. J., Pomares, H., & Rojas, I. (2024). New Advances and Methodologies in the Field of Time Series and Forecasting ITISE-2024. Engineering Proceedings, 68(1), 67. <https://doi.org/10.3390/engproc2024068067>.
15. Zhang, M. and Chen, Y. (2018). Link prediction based on graph neural networks. Advances in Neural Information Processing Systems. 32nd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2018), Montréal, Canada.
16. Zhang, L., Wang, R., Li, Z., Li, J., Ge, Y., Wa, S., Huang, S., & Lv, C. (2023). Time-Series Neural Network: A High-Accuracy Time-Series Forecasting Method Based on Kernel Filter and Time Attention. Information, 14(9), 500. <https://doi.org/10.3390/info14090500>

Клименко Олександр Вікторович

TEAM International,
старший розробник програмного забезпечення,
US, Lake Mary, 1145 TownPark Avenue, Suite 2201
alexanderklmn@gmail.com
ORCID:0009-0000-5924-3697

Сухомлинова Олена Валеріївна

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут,
старший викладач,
вул. Князів Острозьких, 45/1, м. Київ, Україна, 01011
osukhomlynova@gmail.com
ORCID:0000-0001-7592-7255

Кравченко Вікторія Валеріївна

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут,
викладач,
вул. Князів Острозьких, 45/1, м. Київ, Україна, 01011
elzkravchenko@ukr.net
ORCID:0000-0003-0399-7013

Для посилань:

Клименко О. В., Сухомлинова О. В., Кравченко В. В. Методи обробки великих даних і прогнозування тимчасових рядів за допомогою нейронних мереж. Механіка та математичні методи, 2025. Т. VII. №. 1. С. 103–114.

For references:

O. Klymenko, O. Sukhomlynova, V. Kravchenko. (2025). Methods of processing big data and forecasting time series using neural networks . Mechanics and Mathematical Methods. VII (1). 103–114.

УДК 624.04

ГРАНИЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ АРОК ІЗ ВРАХУВАННЯМ ЗГИНАЛЬНОГО МОМЕНТУ І ПОВЗДОВЖНЬОЇ СИЛИ

Сорока М. М.¹

¹*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

Анотація: Розглядається граничний стан кругових арок постійної і змінної жорсткості. Матеріал арок пружно-пластичний і має різні границі текучості при розтягуванні і стисненні. Армування перерізу також прийнято у вигляді пружно-пластичного матеріалу із однаковими границями текучості при розтягу і стисненні. Розглянуто використання у розрахунках двох факторів – поздовжньої сили і згинального моменту. Для визначення граничного навантаження використовується метод граничної рівноваги із залученням області міцності поперечного перерізу арки. Область міцності перерізу арки будується на основі аналітичних залежностей [12].

Для знаходження граничного навантаження для арок запропонований алгоритм і розроблена програма розрахунку. Алгоритм розрахунку використовує так званий «прямий метод». Такий підхід не потребує використання ітераційних процесів, що сприяє більшій точності розрахунків. Програма розрахунку, яка реалізує даний алгоритм, написана на APDL і виконується у середовищі ANSYS. У програмі реалізований розрахунок двошарнірних і безшарнірних кругових арок із двотавровим армованим перерізом. Використання APDL дозволяє досить просто перейти до розрахунку арок будь-якої геометричної форми. Для цього потрібно лише скоригувати блок опису геометрії розрахункової моделі. Розрахунок також можна виконувати при дії будь-якого простого навантаження. Приклади розрахунку виконані для арок із прямокутним не армованим перерізом при дії рівномірно розподіленого вертикального навантаження.

У результаті розрахунків одержані значення граничних навантажень для арок постійної і змінної жорсткості. Проведено порівняння одержаних граничних навантажень із граничними навантаженнями, які були одержані із врахуванням тільки згинального моменту. Показано, що розрахунок арок за граничним станом необхідно проводити із врахуванням і згинального моменту і поздовжньої сили. Врахування при обчисленні тільки згинального моменту не дозволяє використати повну несучу здатність поперечного перерізу, що призводить до значних похибок у визначенні граничного навантаження для арки.

Ключові слова: арки, пружнопластичне тіло, прямокутний перетин, пластичний шарнір, розрахунок за граничною рівновагою

LIMIT LOAD OF ARCHES TAKING INTO ACCOUNT BENDING MOMENT AND LONGITUDINAL FORCE

M. Soroka¹

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

Abstract: The limit state of circular arches of constant and variable stiffness is considered. The material of the arches is elastic-plastic and has different yield points in tension and compression. The reinforcement of the section is also taken in the form of an elastic-plastic material with the same yield points in tension and compression. The use of two factors in the calculations is considered - longitudinal force and bending moment. To determine the ultimate load, the limit equilibrium method is used with the involvement of the strength region of the cross-section of the arch. The strength region of the arch section is built on the basis of analytical dependencies [12].

To find the ultimate load for arches, an algorithm is proposed and a calculation program is developed. The calculation algorithm uses the so-called "direct method". This approach does not require the use of iterative processes, which contributes to greater accuracy of calculations. The calculation program that implements this algorithm is written in APDL and runs in the ANSYS



environment. The program implements the calculation of two-hinged and hingeless circular arches with an I-beam reinforced section. Using APDL makes it quite easy to proceed to the calculation of arches of any geometric shape. To do this, you only need to adjust the geometry description block of the calculation model. The calculation can also be performed under the action of any simple load. The calculation examples are performed for arches with a rectangular unreinforced section under the action of a uniformly distributed vertical load.

As a result of the calculations, the values of the ultimate loads for arches of constant and variable stiffness were obtained. The obtained ultimate loads were compared with the ultimate loads that were obtained taking into account only the bending moment. It is shown that the calculation of arches according to the limit state must be carried out taking into account both the bending moment and the longitudinal force. Taking into account only the bending moment when calculating does not allow using the full bearing capacity of the cross section, which leads to significant errors in determining the ultimate load for the arch.

Keywords: arches, elastoplastic body, rectangular section, plastic hinge, calculation by limit equilibrium.

1 ВСТУП

Широке використання залізобетонних, дерев'яних і металевих арок у якості несучих конструкцій будівель та споруд потребує удосконалення методики їх розрахунку. Знання граничного навантаження необхідне як для арок, які проєктуються, так і для арок, які знаходяться в процесі експлуатації. Оскільки більшість розрахунків несучої здатності арок виконуються із врахуванням тільки згинальних моментів, виникла необхідність виявити, як впливає врахування поздовжньої сили на величину граничного навантаження. У попередній роботі [13] проведено розрахунок несучої здатності арок без врахування поздовжньої сили. У даній роботі представлена чисельна методика розрахунку несучої здатності двохшарнірної і безшарнірної арок із врахуванням впливу поздовжньої сили і моменту на величину граничного навантаження. Виконано порівняння результатів розрахунку із результатами роботи [13].

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Теоретичні роботи, присвячені дослідженню граничного стану конструкцій [1] - [4] опубліковані у першій половині двадцятого століття, коли був створений належний математичний апарат. У перших дослідженнях, виконаних із використанням створеної теорії граничної рівноваги, вважалось, що найбільш значимим фактором від якого залежить величина граничного навантаження, є згинальний момент. Було введено поняття пластичного шарніру, який дозволяв вільний поворот частин конструкції. Але, на відміну від простого шарніру, у пластичному шарнірі діяв пластичний момент. Подальші дослідження [3] - [7] показали, що врахування тільки згинального моменту не завжди приводить до вірного результату. Наприклад, на величину граничного навантаження для арок систем значний вплив має поздовжня сила. Врахування двох факторів – поздовжньої сили і моменту ускладнило розрахунки і привело до введення такого поняття як область міцності. Це область, яка будується у координатах момент – поздовжня сила, окреслена граничними значеннями M_b і N_b . В загальному випадку границя області міцності криволінійна [9, 10, 12], але в деяких випадках для зручності обчислень криволінійну границю замінюють відрізками прямих [3, 5]. Форма області міцності для стрижневих конструкцій залежить від форми поперечного перерізу і діаграми деформування матеріалу. Залежності, які описують область міцності разом із рівняннями статички і деякими обмеженнями можна розглядати як екстремальну задачу, розв'язок якої дає значення граничного навантаження [11]. Але, така методика розрахунку має обмеження. Вона дійсна тільки для симетричних арок із симетричним навантаженням. Для несиметричних систем виникає необхідність створення більш загальної методики розрахунку. Така методика із використанням прямого методу розрахунку [8] і методу скінчених елементів запропонована у даній роботі.

3 МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

У даній роботі поставлена задача дослідження граничного стану арок при врахуванні згинального моменту і поздовжньої сили. Передбачається створення програми для розрахунку арок на основі наведеного алгоритму із використанням методу скінчених елементів. Також передбачається порівняння одержаних результатів із результатами, одержаними раніше при розрахунку граничного стану арок без врахування поздовжньої сили. Розглядаються арки як змінної, так і постійної жорсткості.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методика визначення граничного навантаження для арок базується на гіпотезах теорії розрахунку конструкцій за граничним станом [1, 2, 3].

При створенні програми розрахунку граничного стану арок за методом скінчених елементів використовується прямий метод, який для випадку, коли враховується тільки згинальний момент описаний у підручнику [8]. При врахуванні ще й поздовжньої сили алгоритм розрахунку арки змінної жорсткості можна описати так.

1. Арка розбивається на скінчені елементи (СЕ) постійної жорсткості. Для кожного СЕ арки змінної жорсткості будується область міцності. Для арки постійної жорсткості область міцності єдина для усіх СЕ.

2. Виконується статичний розрахунок арки при дії одиничного навантаження ($q = 1$). Тобто, в усіх перерізах арки визначаються зусилля M_1 і N_1 .

3. Для кожного перерізу арки із застосуванням області міцності визначається комбінація граничних зусиль – згинального моменту M_b і поздовжньої сили N_b , яка переводить переріз у пластичний стан.

4. З урахуванням гіпотез теорії розрахунку систем за граничним станом для усіх перерізів арки визначається значення граничного навантаження

$$q = 1 \cdot |M_b / M_1|, \text{ або } q = 1 \cdot |N_b / N_1|.$$

5. Вибирається переріз, де граничне навантаження найменше і для цього перерізу (скінченого елемента) встановлюються жорсткості EI і EA близькі до нуля.

6. Будується епюри моментів і поздовжніх сил від знайденого граничного навантаження $M_s = qM_1$; $N_s = qN_1$.

7. Перевіряється геометрична змінність арки. Якщо арка стає геометрично змінною розрахунок закінчується.

8. З урахуванням зміни жорсткостей скінчених елементів відповідно до п. 5 арка завантажується одиничним навантаженням і знаходяться нові значення зусиль M_1 і N_1 .

9. Для кожного перерізу арки із застосуванням області міцності і з врахуванням уже існуючих зусиль M_s і N_s визначається комбінація згинального моменту M_b і поздовжньої сили N_b , яка переводить переріз у пластичний стан.

10. Для усіх перерізів визначається приріст граничного навантаження Δq

$$|M_s + \Delta q M_1| = M_b, \text{ або } |N_s + \Delta q N_1| = N_b.$$

11. Вибирається переріз, де приріст граничного навантаження найменший і для цього перерізу (скінченого елемента) встановлюються жорсткості EI і EA близькі до нуля.

12. Будується епюри згинальних моментів і поздовжніх сил:

$$M_s = M_s + \Delta q M_1; \quad N_s = N_s + \Delta q N_1.$$

13. Визначається граничне навантаження для арки на даному етапі розрахунку

$$q = q + \Delta q.$$

14. Перевіряється геометрична змінність арки. Якщо арка є геометрично незмінною розрахунок продовжується, починаючи із п. 8. У протилежному випадку розрахунок закінчується.

Такий алгоритм розрахунку не містить ітераційних процесів і дозволяє досить просто обчислити граничне навантаження, визначити перерізи, які переходять у пластичний стан і побудувати епюри зусиль у граничному стані арки.

Розглянемо більш детально декі пункти наведеного алгоритму. Для побудови області міцності поперечного перерізу використовуються аналітичні залежності [12]. Знаходження граничних зусиль для поперечного перерізу базується на допущенні методу граничної рівноваги про лінійне деформування перерізу до досягнення пластичного стану. Для прикладу розглянемо верхню частину області міцності несиметричного перерізу (рис. 1). Граничні зусилля для перерізу, відповідно до п. 3, можна знайти як перетин прямої, яка проходить через нуль і точку з координатами зусиль від одиничного навантаження, із границею області міцності.

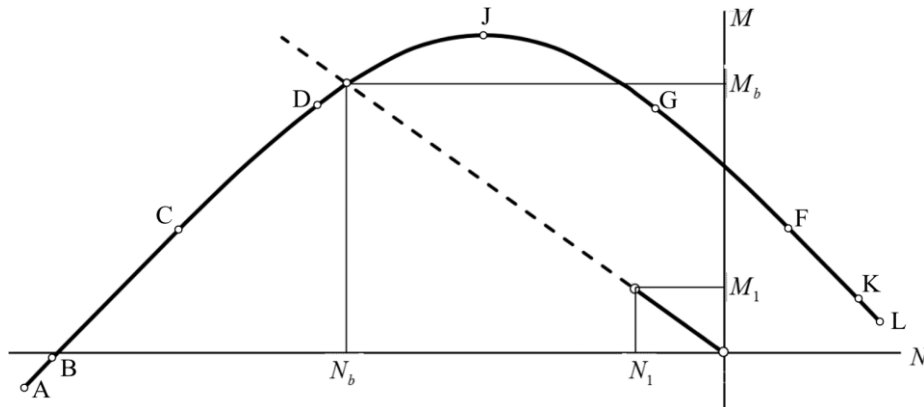


Рис. 1. Визначення граничних зусиль для перерізу, відповідно до п. 3 алгоритму розрахунку

Для знаходження граничних зусиль у перерізі відповідно до п. 9 необхідно враховувати зусилля M_s і N_s , які діють у перерізі, і вже від них відкладати значення одиничних зусиль (рис. 2).

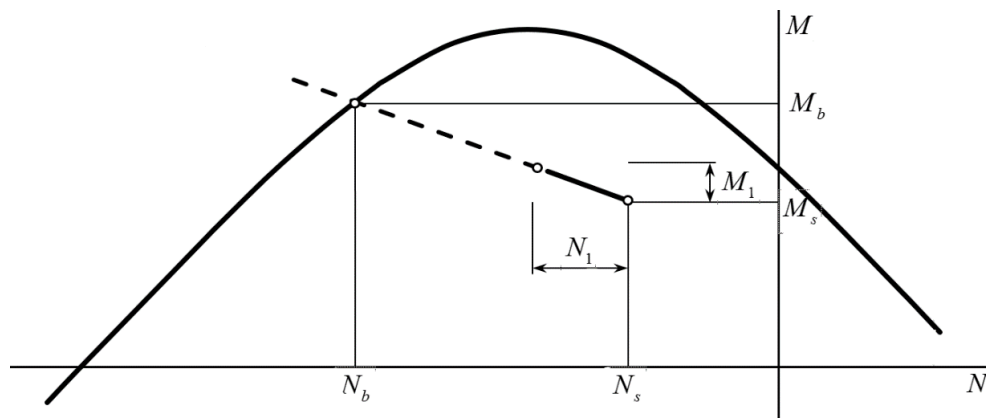


Рис. 2. Визначення граничних зусиль для перерізу, відповідно до п. 9 алгоритму розрахунку

За описаним алгоритмом складена програма розрахунку арок за граничним станом. Для написання програми використовувалась мова програмування APDL, яка є складовою частиною програмного комплексу ANSYS. Використання APDL обумовлене тим, що статичний розрахунок арки, побудову епюр внутрішніх зусиль, побудову деформованої схеми арки бере на себе ПК ANSYS. У програмі на APDL потрібно лише задати параметри арки і описати порядок дій відповідно до алгоритму розрахунку. Програма складена у припущенні, що арка має двотавровий поперечний переріз, армований подвійною арматурою [12]. Із такого перерізу, змінюючи його параметри, легко одержати тавровий, або прямокутний переріз.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Приклади розрахунку

Розглядаються двошарнірна і безшарнірна не армовані арки прямокутного поперечного перерізу постійної і змінної жорсткості, завантажені рівномірно розподіленим вертикальним навантаженням. Параметри арок [13]: проліт $l=20\text{м}$, стріла підйому $f=1\div 9\text{м}$, розміри поперечного перерізу $b=0.2\text{м}$, $h=1.0\text{м}$ (для арки змінної жорсткості $h_0=1.0\text{м}$), фізичні характеристики матеріалу $\sigma_{yc}=14500\text{кН/м}^2$, $\sigma_{yt}=1300\text{кН/м}^2$, $M_0=119.3038\text{кНм}$.

Базові точки області міцності для описаного поперечного перерізу представлені у таб. 1. Для не армованого перерізу точки В і С і точки F і К – співпадають. Для симетричного перерізу область міцності симетрична відносно осі N .

Таблиця 1

Базові точки області міцності

Верхня границя			Нижня границя		
Точка	$M_b, \text{кН/м}$	$N_b, \text{кН}$	Точка	$M_b, \text{кН/м}$	$N_b, \text{кН}$
A	0.000	-2900.000	A	0.000	-2900.000
B	45.978	-2805.200	B1	-45.978	-2805.200
C	45.978	-2805.200	C1	-45.978	-2805.200
D	142.200	-2584.000	D1	-142.200	-2584.000
J	395.000	-1320.000	J1	-395.000	-1320.000
G	142.200	-56.000	G1	-142.200	-56.000
F	45.978	165.000	F1	-45.978	165.000
K	45.978	165.000	K1	-45.978	165.000
L	0.000	260.000	L	0.000	260.000

Результати розрахунку арок за запропонованим алгоритмом представлені у таб. 2, 3. Там же представлені результати, одержані із врахуванням тільки згинального моменту, одержані у роботі [13].

Таблиця 2

Значення граничного навантаження для двошарнірної арки, кН/м

f/l	Постійної жорсткості			Змінної жорсткості		
	З урахуванням М	З урахуванням М, N	Відмінність %	З урахуванням М	З урахуванням М, N	Відмінність %
0.05	1390.847	46.648	18.70	1383.348	46.656	18.69
0.10	347.7326	99.676	11.09	340.198	99.678	10.94
0.15	154.5364	146.727	0.52	147.253	142.151	0.35
0.20	86.92066	164.465	6.17	79.887	151.784	6.21
0.25	55.63248	154.724	9.42	48.886	135.894	9.42
0.30	38.63138	123.618	10.48	32.174	99.971	10.26
0.35	28.37138	77.001	9.23	22.213	57.059	8.79
0.40	21.72562	43.438	6.66	15.811	30.822	6.44
0.45	17.16934	28.138	4.84	11.406	18.761	4.88

Таблиця 3

Значення граничного навантаження для безшарнірної арки, kH/m

f/l	Постійної жорсткості			Змінної жорсткості		
	З урахуванням М	З урахуванням М, N	Відмінність %	З урахуванням М	З урахуванням М, N	Відмінність %
0.05	479.118	17.502	185.90	512.931	17.535	186.78
0.10	119.304	65.843	57.75	128.426	66.944	62.94
0.15	57.486	122.385	72.16	59.545	128.157	73.11
0.20	91.912	164.068	56.38	95.783	174.751	58.38
0.25	76.355	160.883	71.26	89.509	195.192	74.24
0.30	53.024	121.709	78.62	66.663	175.543	89.91
0.35	38.957	77.334	66.00	53.463	142.221	90.72
0.40	29.826	44.094	38.60	46.165	113.199	84.13
0.45	23.566	26.917	13.28	44.715	111.460	85.47

Графічне зображення зміни граничного навантаження для арок представлено на рис. 3-6. Для похилих арок граничне навантаження, визначене без врахування поздовжньої сили, має досить велике значення. Але аналіз показує, що для двохшарнірних арок із $f/l \leq 0.15$ і для безшарнірних арок із $f/l \leq 0.1$ поздовжня сила перевищує границю міцності перерізу і руйнування перерізу відбувається за рахунок поздовжньої сили, а не моменту.

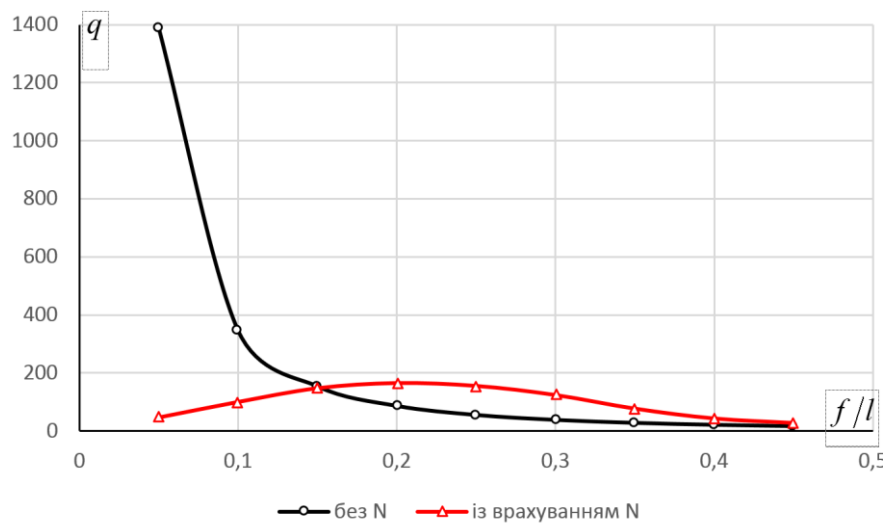


Рис. 3. Граничне навантаження для двохшарнірної арки постійної жорсткості

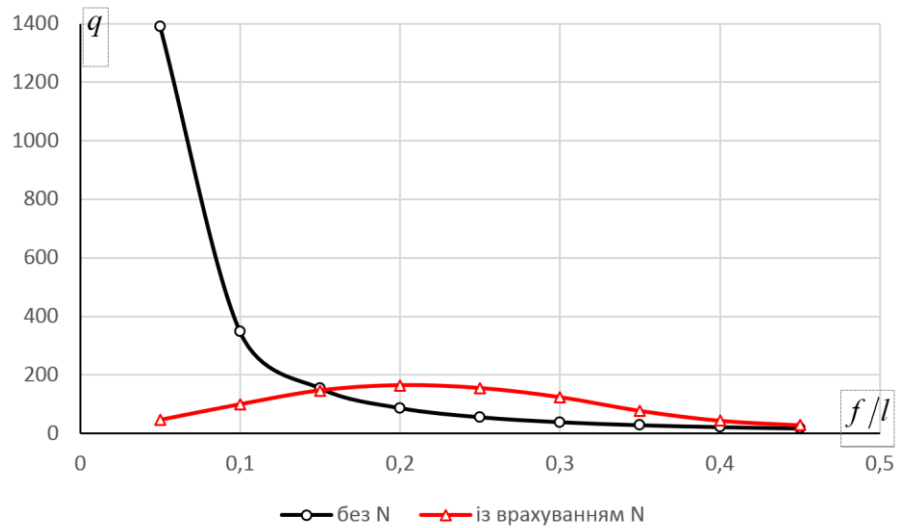


Рис. 4. Граничне навантаження для двошарнірної арки змінної жорсткості

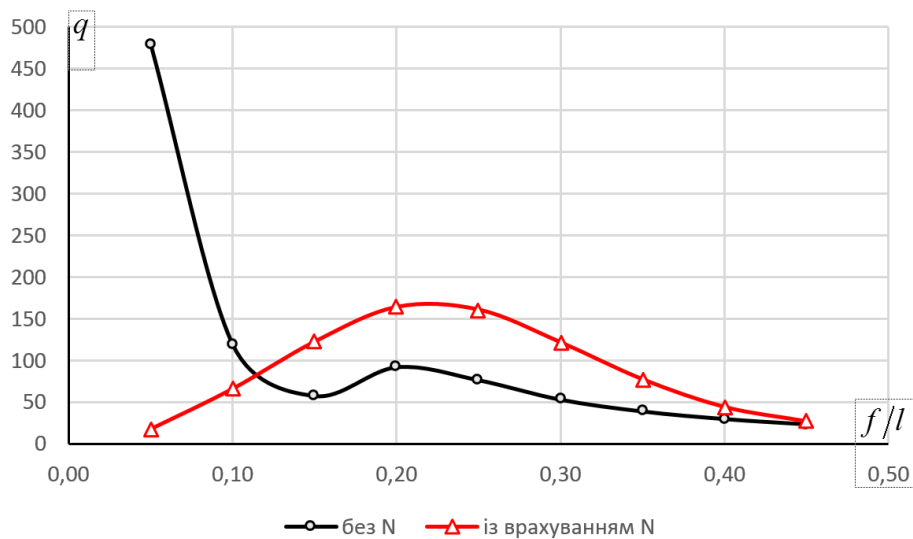


Рис. 5. Граничне навантаження для безшарнірної арки постійної жорсткості

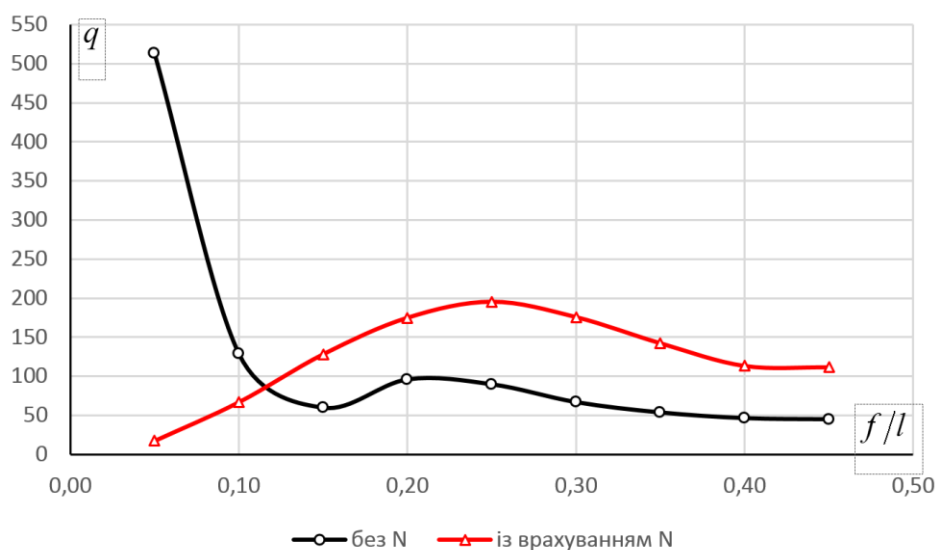


Рис. 6. Граничне навантаження для безшарнірної арки змінної жорсткості

6 ВИСНОВКИ

1. Запропонований алгоритм розрахунку систем за граничним станом з урахуванням згинального моменту і поздовжньої сили не містить ітераційних процедур і його точність визначається точністю методу скінчених елементів.

2. Значення граничного навантаження для пологих арок, одержане без врахування поздовжньої сили, не можна вважати достовірним, так як руйнування перерізів відбувається не за рахунок згинального моменту, а за рахунок поздовжньої сили.

3. Врахування згинального моменту і поздовжньої сили дає можливість використати додаткові резерви матеріалу і приводить до збільшення граничного навантаження, що підвищує несучу здатність системи.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автор не має будь-яких фінансових чи нефінансових інтересів щодо матеріалів, представлених у цій статті, які слід розкривати.

Література

1. Гвоздев А.А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. Москва: Стройиздат, 1949, -248с.
2. Ржаницын А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов Москва: Гостехиздат, 1954, -287с.
3. Чирас А.А. Строительная механика, теория и алгоритмы. Москва: Стройиздат, 1989, 256с
4. Пиковский А.А. Статика стержневых систем со сжатыми элементами. М.: Физматгиз, 1961. – 394с.
5. Проценко А.М., Власов В.В. Статический принцип предельного равновесия и определение деформированного состояния статически неопределимых железобетонных конструкций в стадии исчерпания их несущей способности. //В сб. НИИЖБ, - «Воздействие статических, динамических и многократно повторяющихся нагрузок на бетон и элементы железобетонных конструкций» –М.: Стройиздат, 1972. – с. 191 – 220
6. Mykola Soroka The limit state of non-hinged arch with a cross-section in the form of an idealized I-beam, URL:<http://www.enggjournals.com/ijet/vol10issue6.html>
7. Габбасов Р.Ф. Чан Тхань Тунг Численный метод расчета арок по предельному равновесию – М: Вестник МГСУ, 2010, № 4, том 1, с. 18-23
8. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика. М: «Высшая школа», 1986, -607с.
9. Russell Bridge & Andrew Wheeler 2000 *Cross-section Strength of Columns*. (Part 1: AS 3600 Design) OneSteel Reinforcing Pty Ltd CAN 004 148 289
10. Vrouwenvelder A.C.W.M. & Witteveen J. 2003 Plasticity Ct 4150. The plastic behaviour and the calculation of the plates subjected to bending. Technical University Delft Faculty of Civil Engineering and Geosciences p 121
11. Mykola Soroka Limit State of Arches Made of Elastoplastic Material : IX International Conference "Actual Problems of Engineering Mechanics", (APEM 2022)
12. Сорока М.М. Граничний стан двотаврового армованого перерізу з використанням пружно-пластичних діаграм деформування матеріалів – Одеса : Механіка та математичні методи, 2023, V 1, с. 72-83
URL: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2023-5-1-72-83>
13. Сорока М. М. Механізми пластичного руйнування арок. Механіка та математичні методи, 2024. Т. VI. №. 2. С. 88–99
URL: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-2-88-99>

References

1. Gvozdev A.A. Raschet nesushchey sposobnosti konstruktsiy po metodu predel'nogo ravnovesiya. Moscow: Stroyizdat, (1949), - 248 p. (in Russian)
2. Rzhanitsyn A.R. Raschet sooruzheniy s uchetom plasticheskikh svoystv materialov. Moscow: The state publishing house of literature on construction and architecture, (1954), 287 p.
3. Chiras A.A. Stroitel'naya mekhanika, teoriya i algoritmi. Moscow: Stroyizdat, (1989), 256 p.
4. Pikovsky A.A. Statika sterzhnevih system so szhatimy elementamy. Moscow: State publishing house of physical and mathematical literature, (1961), 394 p. (in Russian)
5. Protsenko A.M., Vlasov V.V. Sticheskiy printsip predel'nogo ravnovesiya i opredeleniye deformirovannogo sostoyaniya staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh konstruktsiy v stadii ischerpaniya ikh nesushchey // V sb. NIIZHB, - «Vozdeystviye staticheskikh, dinamicheskikh i mnogokratno povtoryayushchikhsya nagruzok na beton i elementy zhelezobetonnykh konstruktsiy», Moscow: Stroyizdat, (1972), - p. 191-220 (in Russian)
6. Mykola Soroka The limit state of non-hinged arch with a cross-section in the form of an idealized I-beam, URL: <http://www.enggjournals.com/ijet/vol10issue6.html>
7. Gabbasov R.F. Chan Tkhan' Tung Chislennyy metod rascheta arok po predel'nomu ravnovesiyu – M: Vestnik MGSU, 2010, № 4, tom 1, s. 18-2 (in Russian)
8. Darkov A.V., Shaposhnikov N.N. Stroitel'naya mekhanika. M: «Vysshaya shkola», 1986, -607s.. (in Russian)
9. Russell Bridge & Andrew Wheeler 2000 Cross-section Strength of Columns. (Part 1: AS 3600 Design) OneSteel Reinforcing Pty Ltd CAN 004 148 289
10. Vrouwenvelder A.C.W.M. & Witteveen J. 2003 Plasticity Ct 4150. The plastic behaviour and the calculation of the plates subjected to bending. Technical University Delft Faculty of Civil Engineering and Geosciences p 12111. Mykola Soroka Limit State of Arches Made of Elastoplastic Material: IX International Conference "Actual Problems of Engineering Mechanics", (APEM 2022)
11. Mykola Soroka Limit State of Arches Made of Elastoplastic Material : IX International Conference "Actual Problems of Engineering Mechanics", (APEM 2022)
12. Soroka M.M. Hranychnyy stan dvutavrovoho armovanoho pererizu z vykorystannyam pruzhnoplastychnykh diahram deformuvannya materialiv – Odesa : Mekhanika ta matematychni metody, 2023, V 1, s. 72-83
URL: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2023-5-1-72-83>
13. Soroka M. M. Mekhanizmy plastychnoho ruynuvannya arok. Mekhanika ta matematychni metody, 2024. T. VI. №. 2. S. 88–99
URL: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-2-88-99>

Сорока Микола Миколайович

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
к.т.н., доцент,
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
soroka@odaba.edu.ua
ORCID: 0000-0002-9551-9475

Для посилань:

Сорока М. М. Граничне навантаження арок із врахуванням згинального моменту і повздовжньої сили. Механіка та математичні методи, 2025. Т. VII. № 1. с. 115-124.

For references:

M. Soroka. (2025). Limit load of arches taking into account bending moment and longitudinal force. Mechanics and Mathematical Methods. VII (1). 115–124.

УДК 004.58

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ У ЗАКРИТИХ ПРИМІЩЕННЯХ

Лисенко М. С.¹

¹*Державний університет «Житомирська політехніка»*

Анотація: Розвиток інклюзивного середовища є важливим аспектом сучасного суспільства, зокрема у сфері навігаційних систем для внутрішніх приміщень. Багато існуючих алгоритмів пошуку найкоротшого шляху, таких як класичний алгоритм Дейкстри, не враховують специфічні потреби користувачів з обмеженими можливостями. Це може призводити до створення маршрутів, які є непридатними або незручними для людей на інвалідних візках, осіб з порушенням зору, а також для тих, хто має тимчасові труднощі з пересуванням. Особливо критичною така проблема є в медичних закладах, де швидкість і доступність переміщення можуть безпосередньо впливати на якість обслуговування та безпеку пацієнтів.

У цій роботі пропонується модифікація алгоритму Дейкстри, яка дозволяє динамічно адаптувати ваги ребр графа відповідно до особливих потреб користувачів та поточних умов середовища. Запропонований метод використовує продукційну модель знань, що дає змогу системі приймати рішення на основі формалізованих правил, враховуючи параметри доступності, зокрема наявність ліфтів, пандусів, ширину дверних прорізів, освітлення, тактильні позначки та інші фактори. Розроблена адаптивна навігаційна система, що реалізована на основі модифікованого алгоритму Дейкстри, має такі ключові переваги: можливість персоналізації маршрутів відповідно до профілю користувача, автоматичне виключення недоступних або малоприсадатних шляхів, динамічне коригування маршруту в разі змін середовища (наприклад, ремонтних робіт або несправності ліфтів).

Запропонований алгоритм може бути використаний для оптимізації навігації не лише в медичних закладах, а й у торговельних центрах, навчальних установах, транспортних вузлах та інших будівлях з інтенсивним потоком людей. Результати проведеного дослідження свідчать, що впровадження адаптивного підходу до пошуку маршрутів підвищує рівень доступності та зручності навігації для всіх категорій користувачів. Подальший розвиток системи може включати інтеграцію технологій штучного інтелекту для автоматичного аналізу змін у середовищі, а також розширення алгоритму для роботи у відкритих просторах, зокрема у міських навігаційних системах.

Ключові слова: адаптивність, алгоритм Дейкстри, граф, інклюзивність, користувачі, медичні заклади, навігація, маршрут, пошук шляху, приміщення, продукційна модель представлення знань, система, технології.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR SEARCHING FOR THE OPTIMAL ROUTE IN INDOOR PREMISES

M. Lysenko¹

¹*State University "Zhytomyr Polytechnic"*

Abstract: The development of an inclusive environment is a crucial aspect of modern society, particularly in the field of indoor navigation systems. Many existing shortest path algorithms, such as the classic Dijkstra's algorithm, do not take into account the specific needs of users with disabilities. This can lead to the creation of routes that are unsuitable or inconvenient for wheelchair users, individuals with visual or hearing impairments, and those with temporary mobility difficulties. This



issue is especially critical in medical facilities, where the speed and accessibility of movement can directly impact the quality of service and patient safety.

This paper presents a modification of Dijkstra's algorithm that allows for the dynamic adaptation of graph weights according to the specific needs of users and the current environmental conditions. The proposed approach integrates a production knowledge model, enabling the algorithm to make decisions based on formalized rules that consider accessibility parameters such as the availability of elevators, ramps, doorway widths, lighting, tactile markings, and other factors.

The adaptive navigation system, built on the basis of the modified Dijkstra's algorithm, offers several key advantages: the ability to personalize routes according to the user's profile, automatic exclusion of inaccessible or unsuitable paths, and dynamic route adjustment in response to environmental changes (e.g., construction work or elevator malfunctions). The proposed algorithm can be used to optimize navigation not only in medical facilities but also in shopping centers, educational institutions, transportation hubs, and other buildings with high pedestrian traffic.

The results of the study indicate that implementing an adaptive approach to route searching significantly enhances accessibility and convenience for all categories of users. Future system development may include the integration of artificial intelligence technologies for real-time analysis of environmental changes, as well as extending the algorithm for use in open spaces, particularly in urban navigation systems.

Keywords: adaptivity, building, Dijkstra's algorithm, graph, inclusivity, medical facilities, navigation, pathfinding, production knowledge model, route, system, technologies, users.

1 ВСТУП

Сучасні інженерні системи стають все більш складними та динамічними. Вимоги до їх продуктивності, надійності та ефективності зростають, що формує потребу у нових підходах до проектування та управління цими системами. Традиційні алгоритми не завжди можуть ефективно справлятися зі змінами в середовищі або вимогами до систем і саме тому адаптивні алгоритми, які можуть змінювати свою поведінку в залежності від умов, дозволяють більш ефективно вирішувати завдання в динамічних середовищах.

Концепція роєвого інтелекту, яка базується на поведінці колективів біологічних організмів (наприклад, мурах або птахів), є перспективним підходом для розробки адаптивних алгоритмів. Використання роєвого інтелекту дозволяє створювати розподілені, гнучкі та стійкі системи управління. У багатьох сферах, таких як робототехніка, енергетика, транспорт та інші, інженерні системи потребують ефективних методів управління для підвищення продуктивності та зниження витрат і розробка нових алгоритмів на основі роєвого інтелекту може значно покращити ці процеси. Впровадження адаптивних алгоритмів роєвого інтелекту у проектування та управління інженерними системами має великий потенціал для підвищення їх ефективності, надійності та стійкості, що призводить до покращення роботи існуючих систем та створення нових, більш досконалих рішень. Таким чином, дослідження з розробки адаптивних алгоритмів роєвого інтелекту є надзвичайно актуальним та важливим для розвитку сучасних інженерних систем і має значний потенціал для практичного застосування у різних галузях.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасні навігаційні системи для будівель представлено в ряді робіт закордонних та вітчизняних науковців. Зупинимось на кількох з них.

Авторами [1] представлено основні принципи трьох алгоритмів пошуку найкоротшого шляху та проведено їхнє порівняння шляхом аналізу часової та просторової складності. Крім того, узагальнено область застосування різних алгоритмів. Алгоритм Дейкстри – це класичний алгоритм отримання найкоротшого шляху від конкретної вершини до будь-якої іншої. Його широко використовують в дорожніх маршрутах. Цей алгоритм можна використовувати лише тоді, коли у графі не існує жодного ребра з від'ємною вагою. Алгоритм Беллмана-Форда можна використовувати на графах з від'ємною вагою ребр, якщо граф не містить негативного циклу, доступного з вихідної вершини. Результат роботи цього алгоритму можна використати для визначення існування циклу від'ємної ваги у графі. Алгоритм Флойда-Уоршелла – це алгоритм динамічного програмування, який може вирішити проблему найкоротшого шляху між будь-якими двома вершинами. Метод використовується на зважених графах, у яких можуть бути як додатні, так і від'ємні ваги ребр, проте у ньому не має бути від'ємних циклів. Таким чином, цей метод загальніший у порівнянні з алгоритмом Дейкстри. Однак, у практиці ці три алгоритми безпосередньо не застосовуються, а проводиться їх модифікація та оптимізація для підвищення ефективності.

У дослідженні [2] авторами порівнювалися алгоритми пошуку шляху A^* , Дейкстри та пошук у ширину (BFS) у грі Maze Runner. Процес порівняння цих алгоритмів полягав у заміні алгоритму в грі та вимірюванні часу процесу, довжини маршруту та кількості блоків, задіяних в існуючому обчислювальному процесі.

Luay S. Jabbar, Eyad I. Abbas, Sundus D. Hasanb у своєму дослідженні [3] висвітлюють процес впровадження ретроактивної структури даних черги пріоритетів,

що робить алгоритм Дейкстри динамічним. У цьому дослідженні було змінено підхід, спрямований на пересування вперед у найкоротшому напрямку для двох мереж та двох маршрутів. Спочатку знаходиться статичний найкоротший шлях, потім здійснюється перехід до першого вузла після початкового. У цьому вузлу ваги у сегментах, спрямованих із цього вузла, змінюються, що анулює попередній найкоротший шлях та дозволяє знайти новий маршрут. Потім здійснюється перехід до наступного вузла у знайденому найкоротшому шляху, і операція повторюється до завершення. Ідея полягає в тому, що найкращий маршрут може постійно змінюватися на основі останніх даних. Ці безперервні зміни розглядаються у цій роботі, де запропонована система здатна знаходити оптимальні маршрути та автоматично оновлювати їх відповідно до змінних параметрів.

Авторами дослідження [4] було реалізовано метод алгоритму Дейкстри для пошуку найкоротшого шляху в GIS. Технологія GIS використовує алгоритм Дейкстри для надання інформації, візуально відображаючи дані про місцезнаходження доріг, місць та найкоротшого маршруту від початкового до кінцевого пункту на карті. Геоінформаційна система пошуку найкоротшого маршруту відображає візуалізацію просторових даних карт промислових зон, інтегрованих із GoogleMaps.

Автори [6] досліджують застосування алгоритму Дейкстри для знаходження найкоротшого шляху в дорожніх мережах. Вони підкреслюють важливість вирішення цієї задачі для міських транспортних систем, навігаційних програм та оптимізації маршрутів. У роботі розглядаються основи графової теорії, методологія алгоритму та його ефективність. Основна увага приділяється класичному підходу до вирішення задачі пошуку найкоротшого шляху для статичних графів із невід'ємними вагами. Крім теоретичного опису, автори наводять експериментальні результати, що демонструють застосування алгоритму на реальних дорожніх мережах. Використання мови програмування Java для візуалізації результатів дозволяє оцінити ефективність алгоритму. Висновки статті вказують на потенціал алгоритму Дейкстри, проте визнають необхідність покращень для динамічних та великих мереж.

Стаття [7] досліджує використання алгоритму Дейкстри для визначення найкоротшого маршруту між туристичними локаціями. Автори акцентують увагу на оптимізації подорожей за допомогою геоінформаційних технологій, що дозволяють скорочувати відстань, час та витрати на поїздки. Дослідження охоплює процес розробки веб-застосунку, заснованого на алгоритмі Дейкстри, з мобільною адаптацією. Описано етапи створення системи, включаючи збір даних, проектування за допомогою UML, реалізацію та тестування. Результати експериментального аналізу показують ефективність алгоритму для статичних маршрутів, але наголошується на необхідності врахування динамічних змін, таких як дорожні затори. Автори рекомендують розширення функціоналу застосунку шляхом інтеграції даних про трафік.

Стаття [8] досліджує вдосконалення алгоритму Дейкстри для навігації під час евакуації. Авторами запропоновано систему автономної евакуації (AEN), що використовує динамічні вказівники для спрямування людей найкоротшим і водночас безпечним маршрутом. Основні модифікації алгоритму включають блокування небезпечних вузлів (наприклад, зон займання) та обмеження напрямків руху. Методологія включає побудову графа будівлі, розміщення вузлів та обчислення шляхів. Аналіз доводить ефективність змін у виборі безпечного маршруту. Дослідження актуальне для евакуаційних систем, покращуючи швидкість і точність маршрутизації. Подальші дослідження можуть спрямовуватися на масштабованість алгоритму для великих споруд.

Дослідження [9] присвячене застосуванню алгоритму Дейкстри для визначення найкоротшого шляху в графі з динамічною вагою ребер, що моделює дорожню

мережу. Автори розглядають одно- та двосторонні орієнтовані графи. Експерименти проводилися на двох типах карт (Мар А та Мар В), що відрізняються розподілом ваги ребер. Результати показали ефективність алгоритму Дейкстри для односторонніх графів, але виявили проблеми з циклічністю у двосторонніх графах, що призводило до неможливості знайти рішення у 17,5% випадків. Дослідження також оцінювало вплив динамічної зміни ваги на час обчислення, показавши незначний вплив на швидкість роботи алгоритму. Автори обговорюють причини виникнення циклів у двосторонніх графах та пропонують шляхи їх усунення. Загалом, робота демонструє практичну застосовність алгоритму Дейкстри для задач маршрутизації з динамічною вагою, але підкреслює необхідність врахування особливостей структури графу при його використанні.

Стаття [10] досліджує систему навігації для незрячих та користувачів з вадами зору університетського кампусу. Основою системи є модифікований алгоритм Дейкстри, що працює з графовою структурою даних, де вузли представляють локації (аудиторії, коридори тощо), а ребра – шляхи між ними з детальними описами. Система враховує просторові координати та кути поворотів, забезпечуючи точні та зрозумілі інструкції. Використання алгоритму Дейкстри гарантує знаходження найкоротшого шляху, а додавання контекстних описів та обчислення кутів поворотів робить навігацію більш інтуїтивною та зручною для користувачів. Інтерфейс системи адаптований для роботи з програмним забезпеченням для читання екрану, що робить її доступною для людей з вадами зору. Автори стверджують, що система значно покращує автономність та безпеку пересування незрячих людей в університетському середовищі. Дослідження демонструє успішне застосування алгоритму Дейкстри в контексті навігації для людей з вадами зору, підкреслюючи важливість врахування просторових особливостей та контекстуальної інформації для ефективної навігації.

3 ЦІЛІ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основною метою даного дослідження є розробка алгоритму пошуку оптимальних маршрутів у закритих приміщеннях шляхом модифікації алгоритму Дейкстри для врахування потреб різних категорій користувачів. Особлива увага приділяється інклюзивності, тобто забезпеченню доступності маршрутів для осіб із обмеженими можливостями, зокрема людей на інвалідних візках, осіб із порушенням зору, людей похилого віку, осіб, що мають тимчасові труднощі з пересуванням (наприклад, травми).

Для реалізації пошуку оптимального маршруту необхідним є впровадження продукційної моделі знань, яка дозволить формалізувати правила й умови для вибору. Продукційна модель знань дасть змогу алгоритму динамічно змінювати критерії оптимальності залежно від профілю користувача, інтегрувати додаткові знання про середовище (наприклад, тимчасово недоступні ліфти чи заблоковані зони), забезпечити гнучкість і адаптивність системи до нових умов.

Результатом дослідження має стати ефективний адаптивний алгоритм, який можна інтегрувати в автоматизовані системи навігації. Такий алгоритм сприятиме поліпшенню користувацького досвіду всередині будівель, особливо в умовах медичних закладів, де точність і швидкість навігації мають критичне значення.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Слід зазначити, що алгоритм Дейкстри є одним із найпоширеніших методів пошуку найкоротшого шляху в графі, що працює шляхом ітеративного визначення мінімальної відстані від стартової вершини до всіх інших вершин графа. Серед ключових характеристик даного алгоритму слід виділити використання пріоритетної черги для вибору вершини з найменшою вагою та статичний підхід, який передбачає

незмінність ваги ребр під час виконання алгоритму. Однак у випадку інклюзивної навігації всередині будівель цей підхід має суттєві обмеження, оскільки не враховує специфічних потреб користувачів та динамічних змін у доступності маршрутів.

Адаптація алгоритму Дейкстри, що пропонується, передбачає кілька ключових змін для врахування параметрів інклюзивності. Пропонується запровадити динамічне коригування ваги ребр. Вага кожного ребра графа (що відповідає сегменту маршруту) визначається не лише довжиною шляху, але й доступністю сегмента для різних категорій користувачів (наприклад, сходи можуть отримати дуже велику вагу для людей на візках), характеристиками середовища (наприклад, погане освітлення додає вагу для людей із вадами зору) та поточним станом елементів інфраструктури (несправність ліфта, ремонт пандуса).

Процес побудови графа для внутрішньої навігації передбачає формальне представлення просторової структури будівлі у вигляді графової моделі $G = (V, E)$, де множина вершин V відповідає ключовим локаціям, таким як приміщення, дверні прорізи, ліфти, а множина ребер E описує можливі шляхи переміщення між ними, наприклад, коридори, сходові марші та пандуси.

Множина вершин V являє собою відкрите класифікаційне угруповання та включає в себе важливі для переміщення точки будівлі v , яким присвоєно унікальний ідентифікатор $i, v_i \in V$, та координати (x_i, y_i) , що відповідають його розташуванню на плані будівлі. Кожна вершина v_i є вузлом зваженого графу, якій притаманні наступні властивості: тип t – кімната (t_1), двері (t_2), сходи (t_3), ліфт (t_4), пандус (t_5), тощо; доступність (accessibility) α – чи доступний вузол для певних груп користувачів (наприклад, користувачів в інвалідних візках); інші атрибути (mark) m – ширина дверей, умови освітлення, тактильні позначки тощо.

Кожне ребро $e_{i,j} \in E$ має вагу ребра ω_{ij} . Вага ребра ω_{ij} визначається за допомогою формули (1):

$$\omega_{ij} = d_{ij} + p_{ij}^k + s_{ij}, \quad (1)$$

де: d_{ij} – фізична відстань між вузлами v_i та v_j ; p_{ij}^k – вага ребра відповідно профілю користувача, яка визначає доступність ребра для певних категорій користувачів (задовольняє потребам користувача); s_{ij} – динамічна вага ребра, пов'язана зі станом середовища (наприклад, тимчасові перешкоди, ремонт, несправності ліфту).

Кожен k -тий користувач системи має власний профіль p^k , який визначає тип потреб (“без особливостей”, “маломобільність”, “порушення зору”) та індивідуальні пріоритети (мінімізація часу або зусиль). Профіль p_{ij}^k впливає на вагу кожного ребра та дозволяє адаптувати маршрут під конкретного користувача. Алгоритм пропонує кілька альтернативних маршрутів, якщо оптимальний за відстанню шлях недоступний через обмеження, то для цього в пріоритетну чергу включаються маршрути з мінімальним компромісом між довжиною і доступністю.

Для врахування параметрів інклюзивності використовуємо наступні показники, а саме, доступність ліфтів, наявність пандусів, освітлення та маркування, ширину проходів, тактильні позначки.

Ліфти мають пріоритет для користувачів на інвалідних візках або з вадами опорно-рухового апарату (профіль користувача – «маломобільність»). У разі несправності ліфта система автоматично додає альтернативний маршрут із використанням пандусів або сходів із мінімальними перешкодами.

Пандуси розглядаються як пріоритетні елементи маршруту для маломобільних користувачів. У разі їх наявності система збільшує вагу ребер, які включають сходи без пандусів.

Для користувачів на візках система виключає вузькі проходи та двері, якщо їх ширина менша за встановлені стандарти доступності.

Для людей із порушенням (вадами) зору вагу ребер збільшують у випадку недостатнього освітлення чи відсутності тактильного маркування.

Граф має динамічно оновлюватися на основі даних про навколишнє середовище в реальному часі, таких як: статус ліфтів (працюють чи не працюють); наявність тимчасових перешкод (будівництво, ремонт або заблоковані шляхи); пішохідний рух (зони інтенсивного руху, які можуть спричинити затримки). Ці дані використовуються для врахування значення s_{ij} в режимі реального часу.

Для реалізації (запуску) алгоритму потрібно виконати ряд послідовних дій, зокрема, **першим етапом** є формування графу будівлі $G = (V, E)$. Для цього проводиться ініціалізація вузлів, а саме створюємо вузол v_i для кожного ключового місця в будівлі, які приймають участь у переміщенні пацієнтів по території медичного закладу. Фіксуємо координати (x_i, y_i) кожного v_i -го вузла. Враховуючи результати проведеного аналізу споруд медичних закладів, використання адаптивних алгоритмів, пропонуємо створити наступну множину вузлів V , яка буде об'єднувати наступні підмножини:

- підмножину A – приміщення: кабінети, зони очікування, санітарні вузли;
- підмножину B – двері: точки входу/виходу, дверні прорізи між приміщеннями;
- підмножину C – сходи: міжповерхові переходи;
- підмножину L – ліфти: шахти ліфтів та точки їх входу/виходу.
- підмножину H – пандуси: похилі доріжки для забезпечення доступності.
- підмножину G – перехрестя коридорів: точки злиття чи розгалуження маршрутів.

Визначаємо, що $A \subseteq V, B \subseteq V, C \subseteq V, L \subseteq V, H \subseteq V, G \subseteq V$.

При чому елементи вказаних підмножин не належать іншим підмножинам, тобто:

$$\begin{aligned} A \cap B = \emptyset, A \cap C = \emptyset, A \cap L = \emptyset, A \cap H = \emptyset, A \cap G = \emptyset, B \cap C = \emptyset, B \cap L = \emptyset, \\ B \cap H = \emptyset, B \cap G = \emptyset, C \cap L = \emptyset, C \cap H = \emptyset, C \cap G = \emptyset, L \cap H = \emptyset, L \cap G = \emptyset, \\ H \cap G = \emptyset. \end{aligned}$$

Таким чином

$$V = A \cup B \cup C \cup L \cup H \cup G. \quad (2)$$

Множина вузлів буде представляти собою відкрите класифікаційне угруповання, яке буде адаптуватися до будівлі медичного закладу і може бути представлене у вигляді (3):

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, \quad (3)$$

де n – кількість вузлів, визначених у будівлі медичного закладу.

Наступним етапом є ініціалізація ребер. Для виконання даного етапу необхідно створити множину ребер E , яка буде об'єднувати наступні підмножини:

- підмножину F – коридори, що є сполученням між вузлами;
- підмножину I – сходові переходи, що з'єднують поверхи;
- підмножину W – шахти ліфтів, що є вертикальними сполученнями між вузлами;
- підмножину Z – довжина пандусів.

Визначаємо, що $F \subseteq E, I \subseteq E, W \subseteq E, Z \subseteq E$. Елементи вказаних підмножин є унікальними та не входять у інші підмножини. Таким чином, для них справедливо $F \cap I = \emptyset, F \cap W = \emptyset, F \cap Z = \emptyset, I \cap W = \emptyset, I \cap Z = \emptyset, W \cap Z = \emptyset$.

Отже,

$$E = F \cup I \cup W \cup Z. \quad (4)$$

Множина ребр буде представляти собою відкрите класифікаційне угруповання, яке буде адаптуватися до будівлі медичного закладу і може бути представлене у вигляді (5). Враховуємо, що кожне ребро e_{ij} з'єднує два вузли v_i та v_j , $i = \overline{1..n}, j = \overline{2..n}$, де n – кількість вузлів будівлі медичного закладу, отримуємо:

$$E = \{ \forall V, i = \overline{1, \dots, n}, j = \overline{2, \dots, n} \}. \quad (5)$$

Кожне ребро e_{ij} матиме початкову вагу ω_{ij} рівну його фізичній відстані d_{ij} .

$$\omega_{ij} = d_{ij}. \quad (6)$$

Наступним етапом є визначення ваг профілю користувача p_{ij}^k та стану середовища s_{ij} . З метою врахування широкого спектру факторів, які впливають на вибір оптимального маршруту для користувачів із різними потребами, використовується продукційна модель знань.

Продукційна модель знань є ефективним засобом для формалізації правил і умов у системах прийняття рішень. Вона ґрунтується на наборі правил R , які формулюються у форматі: "Якщо (умова), то (дія)". У контексті систем маршрутизації ці правила регулюють зміну ваг маршрутів залежно від профілю користувача та поточного стану середовища. Структура моделі включає кілька ключових компонентів. По-перше, це факти, що містять інформацію про поточний стан середовища, наприклад, доступність ліфтів, пандусів, ширину дверей, а також про профіль користувача. По-друге, набір правил забезпечує логічні умови, які визначають вибір оптимальних маршрутів. Нарешті, модуль прийняття рішень слугує механізмом виконання цих правил, модифікуючи вагу маршрутів відповідно до встановлених умов, що гарантує адаптивність і точність навігаційної системи.

Формалізація правил R_c у продукційній моделі забезпечує можливість динамічного вибору маршрутів із урахуванням встановлених критеріїв. Приклад правил:

Доступність інфраструктури

Правило R_1 : Якщо маршрут включає сходи, а користувач пересувається на візку, то встановити вагу ребра як "нескінченність".

Правило R_2 : Якщо ліфт недоступний (несправність, ремонт), то виключити всі маршрути, які залежать від його використання.

Індивідуальні пріоритети користувача, що визначені його профілем

Правило R_3 : Якщо користувач має обмеження у пересуванні та пріоритетом є мінімізація фізичного навантаження, то додати до ваги ребра коефіцієнт залежно від підйому або спуску.

Правило R_4 : Якщо користувач із вадами зору, а маршрут має погане освітлення, то збільшити вагу ребра на визначений коефіцієнт.

Динамічні умови середовища

Правило R_5 : Якщо сегмент маршруту тимчасово недоступний через ремонт, то виключити відповідне ребро з графа.

Правило R_6 : Якщо в будівлі є велика кількість користувачів, які використовують ліфт, то збільшити вагу ребр, які включають ліфт, через можливі затримки.

Ці правила забезпечують можливість гнучкої адаптації маршруту до різноманітних умов і профілів користувачів.

Вага ребр для конкретного користувача p_{ij}^k визначається профілем користувачів. і характеристиками краю – v_i та v_j . Вона враховує конкретні потреби та обмеження користувача, такі як тип мобільності, сенсорні здібності та тимчасові чи постійні фізичні обмеження

$$p_{ij}^k = \sum_{c=1}^m f_c(U, v_i, v_j), \quad (7)$$

де:

- U : профіль користувача, який містить таку інформацію, як тип мобільності, переваги та обмеження.

- f_c : функція, яка застосовує правило R_c для налаштування ваги ребра на основі профілю користувача U та враховуючи тип країв ребр v_i та v_j зокрема приналежність до підмножин C, L, H .

Значення, пов'язане зі станом середовища s_{ij} враховує умови навколишнього середовища в реальному часі, які можуть вплинути на доступність ребра e_{ij} за рахунок стану вузлів v_i та v_j , а також самого ребра e_{ij} . Це включає такі фактори, як несправність ліфта, тимчасові перешкоди та велика кількість пішоходів

$$s_{ij} = \sum_{c=1}^n g_c(D, e_{ij}, v_i, v_j), \quad (8)$$

де:

- D : Дані про навколишнє середовище, які містять інформацію в реальному часі про інфраструктуру будівлі (наприклад, стан ліфта, умови освітлення).

- g_c : функція, яка застосовує правило R_c для налаштування ваги краю на основі даних навколишнього середовища D та характеристик краю ребра e_{ij} (стан v_i та v_j) та стану самого ребра.

Вага ребр графа визначається комбінацією фізичної відстані, вагою профіля користувача та вагою навколишнього середовища. Формалізуючи ці компоненти за допомогою математичного представлення, адаптивний алгоритм Дейкстри може динамічно регулювати ваги ребр на основі конкретних потреб користувача та стану середовища. Такий підхід гарантує, що навігаційна система забезпечує оптимальні, доступні та безпечні маршрути для всіх користувачів.

Таким чином кроки модифікованого алгоритму Дейкстри будуть наступні:

1. Ініціалізація:

- Для кожного вузла $v_i \in V$, встановлюємо орієнтовну відстань $dist\ v_i = \infty$.

Встановлюємо орієнтовну відстань вихідного вузла $v_i^\alpha\ dist\ v_i^\alpha = \infty$.

- Ініціалізація черги пріоритетів Q з усіма вузлами в V , пріоритетними за їх попередніми відстанями.

2. Основний цикл:

- Поки Q не пуста:



- Витягуємо вузол v_j із найменшою орієнтовною відстанню від Q .
- Для кожного сусіда v_i з v_j :
- Обчислюємо динамічну вагу $\omega_{ij} = d_{ij} + p_{ij}^k + s_{ij}$.
- Якщо $dist(v_i) > dist(v_j) + \omega_{ij}$, оновлення $dist(v_i) = dist(v_j) + \omega_{ij}$.
- Оновлюємо чергу пріоритетів Q новою орієнтовною відстанню для v_i .

3. Припинення:

- Алгоритм завершується, коли всі вузли оброблені та визначено найкоротший шлях від вихідного вузла до вузлів призначення.

Часова складність модифікованого алгоритму Дейкстри залишається $O((V+E)\log V)$, де V – кількість вершин у графі, а E – кількість ребер. Це пояснюється тим, що динамічне коригування ваги не змінює фундаментальної структури алгоритму; він лише змінює ваги ребер під час виконання.

Однак складність простору може дещо збільшитися через необхідність зберігати додаткову інформацію про профілі користувачів і умови середовища. Зазвичай цим можна керувати, оскільки кількість профілів користувачів і факторів навколишнього середовища відносно невелика порівняно з розміром графа.

Розширення структури алгоритму передбачає інтеграцію продукційної моделі як окремого модуля, що активно взаємодіє з основними компонентами адаптивного алгоритму Дейкстри. Модуль профілю користувача забезпечує передачу інформації про індивідуальні потреби та пріоритети, що дозволяє алгоритму враховувати специфічні вимоги кожного користувача. Модуль графа містить базові дані про структуру будівлі, включаючи ребра та вершини графа, які слугують основою для пошуку маршрутів. Водночас модуль продукцій обробляє набір правил, що дозволяють модифікувати ваги ребр графа залежно від динамічних умов середовища та потреб користувача, забезпечуючи адаптивність і ефективність маршрутизації.

Етапи роботи алгоритму з продукційною моделлю:

Ініціалізація: Збираються факти про середовище (доступність маршрутів, стан інфраструктури) та профіль користувача.

Аналіз правил: Продукційна модель обробляє правила, визначаючи необхідні модифікації ваг ребр.

Модифікація графа: Ваги ребр коригуються відповідно до результатів обробки правил. Недоступні маршрути виключаються з графа.

Виконання алгоритму Дейкстри: На оновленому графі виконується пошук найкоротшого шляху, що враховує умови інклюзивності.

Формування результату: Користувачеві надається оптимальний маршрут із поясненням, які правила були застосовані.

Переваги інтеграції:

Гнучкість: можливість швидко адаптуватися до змін у середовищі або потребах користувача.

Масштабованість: можливість додавання нових правил без потреби змінювати основну структуру алгоритму.

Прозорість: чітке пояснення, чому було обрано той чи інший маршрут, підвищує довіру користувачів.

Інтеграція продукційної моделі знань у адаптивний алгоритм Дейкстри створює ефективну систему маршрутизації, здатну враховувати широкий спектр умов і забезпечувати високий рівень інклюзивності. Це рішення дозволяє покращити якість обслуговування в медичних закладах та забезпечити зручність і доступність для всіх категорій користувачів.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Подальший розвиток і вдосконалення системи навігації відкриває значні перспективи для покращення її функціональності, адаптивності та масштабованості. Одним із напрямів є розширення можливостей персоналізації маршрутів, що враховуватимуть рівень фізичної активності, комфортність пересування, а також індивідуальні обмеження чи стан здоров'я користувача. Інтеграція рекомендацій у реальному часі дозволить оперативно коригувати маршрути залежно від змін середовища. Підтримка багатомовності зробить систему доступною для ширшої аудиторії, а впровадження технологій доповненої реальності сприятиме більш інтуїтивній візуалізації маршрутів. Крім того, оптимізація алгоритмів дозволить підвищити швидкість роботи системи, особливо у великих будівлях, зокрема за допомогою машинного навчання для прогнозування завантаженості маршрутів.

Перспективи застосування алгоритму не обмежуються окремими будівлями. У торговельних центрах модифікований алгоритм може допомогти відвідувачам знайти оптимальні маршрути між магазинами чи виходами, враховуючи потоки людей. У навчальних закладах алгоритм полегшить пересування студентів і персоналу, враховуючи обмеження доступності аудиторій. У транспортних вузлах, таких як аеропорти чи вокзали, сприятиме швидкому й зручному пересуванню пасажирів із урахуванням доступних зон і ліфтів. Розширення запропонованого алгоритму пошуку оптимального маршруту на зовнішнє середовище відкриє можливості створення інклюзивних міських маршрутів, враховуючи якість тротуарів, пандусів чи транспортної інфраструктури. Крім того, алгоритм може бути застосований у системах евакуації для оптимального виведення людей із будівель під час надзвичайних ситуацій або в туристичних маршрутах для забезпечення доступності визначних пам'яток.

Подальші теоретичні дослідження спрямовані на адаптацію алгоритму для специфічних задач, таких як енергоефективність або підвищення безпеки. Поєднання алгоритму Дейкстри з іншими методами оптимізації, наприклад, генетичними алгоритмами чи методами рою частинок, дозволить досягти ще більш точних результатів. Використання комп'ютерних симуляцій для тестування алгоритму у віртуальних середовищах також сприятиме його вдосконаленню.

Масштабування системи передбачає її адаптацію до великих будівельних комплексів і кампусів із багатьма з'єднаними зонами. Розробка універсального API сприятиме інтеграції алгоритму в різні комерційні та державні навігаційні платформи. Це не тільки розширить сферу застосування системи, а й забезпечить підвищення інклюзивності в широкому масштабі. В результаті запропонований метод може стати основою для створення універсальних рішень, які задовольнятимуть потреби користувачів із різними вимогами в будь-якому середовищі.

6 ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження було досягнуто поставлених цілей, спрямованих на розробку алгоритму пошуку оптимального маршруту у закритих приміщеннях із використанням модифікованого алгоритму Дейкстри та продукційної моделі знань.

У процесі розробки адаптивного алгоритму Дейкстри була створена його модифікована версія, яка враховує специфічні потреби користувачів із обмеженими можливостями. Основною перевагою цієї версії є адаптація ваг ребр графа будівлі залежно від потреб користувача та динамічних умов середовища, таких як доступність ліфтів, пандусів чи наявність перешкод. Алгоритм здатний виключати недоступні

маршрути та пропонувати альтернативні шляхи, забезпечуючи при цьому гнучкість навіть в умовах частих змін середовища, наприклад, під час ремонтів чи виникнення несправностей.

Продукційна модель знань була інтегрована в процес маршрутизації, що дозволило формалізувати правила для вибору маршрутів, забезпечивши об'єктивність і прозорість прийняття рішень. Ця модель враховує широкий спектр факторів, включаючи профіль користувача та характеристики середовища. Завдяки її використанню система стала масштабованою, що дає можливість легко додавати нові правила та розширювати функціонал для покращення адаптації до різних сценаріїв.

Теоретичний внесок цієї роботи полягає у модифікації класичного алгоритму Дейкстри, який може бути застосований у різноманітних задачах маршрутизації. Практичний внесок включає розробку основи для навігаційних систем, що відповідають принципам універсального дизайну. Такі системи можуть бути ефективно використані в медичних закладах, торговельних центрах, навчальних установах та інших типах будівель.

Таким чином, запропонована система пошуку маршруту успішно досягла поставлених цілей. Вона забезпечує адаптивність, інклюзивність і ефективність у навігації всередині будівель, створюючи умови для комфортного пересування користувачів із різними потребами. Результати цього дослідження можуть стати базою для подальших робіт у галузі інклюзивного дизайну та автоматизованих систем навігації.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автор не має будь-яких фінансових чи нефінансових інтересів щодо матеріалів, представлених у цій статті, які слід розкривати.

Література

1. Задача пошуку найкоротшого шляху: порівняльний аналіз основних алгоритмів / В. Бабич та ін. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2023. №2. С. 99–106. URL: <https://doi.org/10.32782/it/2023-2-12> (дата звернення: 10.02.2025).
2. Comparative analysis of pathfinding algorithms A*, Dijkstra, and BFS on Maze Runner game / S. D. Handy Permana et al. *IJISTECH (International Journal Of Information System & Technology)*. 2018. Vol.1, no.2. P.1. URL: <https://doi.org/10.30645/ijistech.v1i2.7> (date of access: 10.02.2025).
3. Jabbar L., Abass E., Hasan S. A modification of shortest path algorithm according to adjustable weights based on Dijkstra algorithm. *Engineering and Technology Journal*. 2022. Vol.41, no.2. P.1–16. URL: <https://doi.org/10.30684/etj.2022.136107.1296> (date of access: 10.02.2025).
4. Jamaludin, Setiyadi D., Retnoningsih E. Dijkstra algorithm for finding the shortest route to company addresses in industrial areas. *Jurnal Mantik*. 2023. Vol.7, no.3. P.2653–2664.
5. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*. 1959. Vol. 1, no. 1. P. 269–271. URL: <https://doi.org/10.1007/bf01386390> (date of access: 10.02.2025).
6. Alam M. A., Faruq M. O. Finding shortest path for road network using dijkstra's algorithm. *Bangladesh journal of multidisciplinary scientific research*. 2019. Vol. 1, no. 2. P. 41–45. URL: <https://doi.org/10.46281/bjmsr.v1i2.366> (date of access: 11.02.2025).
7. Gunawan W., . S., Sudrajat B. Implementation of Dijkstra's algorithm in the shortest route. *Scholars bulletin*. 2019. Vol. 05, no. 12. P. 681–689. URL: <https://doi.org/10.36348/sb.2019.v05i12.001> (date of access: 11.02.2025).
8. Samah K. A. F. A., Hussin B., Basari A. S. H. Modification of Dijkstra's algorithm for safest and shortest path during emergency evacuation. *Applied mathematical sciences*. 2015. Vol. 9. P. 1531–1541. URL: <https://doi.org/10.12988/ams.2015.49681> (date of access: 11.02.2025).

9. Tamatjita E. N., Mahastama A. W. Shortest Path with Dynamic Weight Implementation using Dijkstra's Algorithm. *ComTech: computer, mathematics and engineering applications*. 2016. Vol. 7, no. 3. P. 161. URL: <https://doi.org/10.21512/comtech.v7i3.2534> (date of access: 11.02.2025).
10. Zudikhin Y., Malaksiano M. Navigation system based on Dijkstra's algorithm with spatial context integration. *The scientific heritage*. 2024. No. 143. P. 93–96. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13378618> (date of access: 11.02.2025)

References

1. Babych, V., Kostenko, A., Plesha, V., Plesha, M., & Khmilyarchuk, L. (2023). The problem of finding the shortest path: a comparative analysis of the main algorithms *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (2), 99–106. <https://doi.org/10.32782/it/2023-2-12>
2. Handy Permana, S. D., Yogha Bintoro, K. B., Arifitama, B., & Syahputra, A. (2018). Comparative Analysis of Pathfinding Algorithms A *, Dijkstra, and BFS on Maze Runner Game. *IJISTECH (International Journal of Information System & Technology)*, 1(2), 1. <https://doi.org/10.30645/ijistech.v1i2.7>
3. Jabbar, L., Abass, E., & Hasan, S. (2022). A modification of shortest path algorithm according to adjustable weights based on dijkstra algorithm. *Engineering and Technology Journal*, 41(2), 1–16. <https://doi.org/10.30684/etj.2022.136107.1296>
4. Jamaludin, Setiyadi, D., & Retnoningsih, E. (2023). Djikstra algorithm for finding the shortest route to company addresses in industrial areas. *Jurnal Mantik*, 7(3), 2653–2664.
5. Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271. <https://doi.org/10.1007/bf01386390>
6. Alam, M. A., & Faruq, M. O. (2019). Finding shortest path for road network using dijkstra's algorithm. *Bangladesh Journal of Multidisciplinary Scientific Research*, 1(2), 41–45. <https://doi.org/10.46281/bjmsr.v1i2.366>
7. Gunawan, W., ., S., & Sudrajat, B. (2019). Implementation of Dijkstra's algorithm in the shortest route. *Scholars Bulletin*, 05(12), 681–689. <https://doi.org/10.36348/sb.2019.v05i12.001>
8. Samah, K. A. F. A., Hussin, B., & Basari, A. S. H. (2015). Modification of Dijkstra's algorithm for safest and shortest path during emergency evacuation. *Applied Mathematical Sciences*, 9, 1531–1541. <https://doi.org/10.12988/ams.2015.49681>
9. Tamatjita, E. N., & Mahastama, A. W. (2016). Shortest Path with Dynamic Weight Implementation using Dijkstra's Algorithm. *ComTech: Computer, Mathematics and Engineering Applications*, 7(3), 161. <https://doi.org/10.21512/comtech.v7i3.2534>
10. Zudikhin Y., & Malaksiano M. (2024). Navigation system based n dijkstra's algorithm with spatial context integration. *The Scientific Heritage*, 143, 93–96. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13378618>

Лисенко Максим Сергійович

Державний університет «Житомирська політехніка»,
асистент,
вул. Чуднівська, 103, Житомир, Україна 10005
kkn_lms@ztu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8252-717X

Для посилань:

Лисенко М. С. Розробка алгоритму пошуку оптимального маршруту у закритих приміщеннях. *Механіка та математичні методи*, 2025. Т. VII. № 1. С. 125–137.

For references:

M. Lysenko. (2025). Development of an algorithm for searching for the optimal route in indoor premises. *Mechanics and Mathematical Methods*. VII (1). 125–137.

УДК 614.841.415

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІПСОКАРТОННОГО ВОГНЕЗАХИСНОГО ОБЛИЦЮВАННЯ СТАЛЕВИХ БАЛОК В УМОВАХ ПОЖЕЖІ

Заїка Н. П.¹

¹Національний університет цивільного захисту України

Анотація: Робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі удосконалення розрахункового методу визначення температурних показників у сталевих балках із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в умовах теплового впливу пожежі, необхідний для оцінювання вогнестійкості таких балок. У результаті проведених досліджень одержано дані про теплові характеристики гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок, що є частиною початкових даних для здійснення теплового розрахунку.

Основною теплотехнічною характеристикою гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, що вивчалася була температурна залежність його коефіцієнту теплопровідності при сталих значеннях густини і теплоємності. Дана залежність визначена на основі даних температурних вимірювань при вогневих випробуваннях зразків фрагментів сталевих балок.

Для практичної реалізації теплотехнічного розрахунку для оцінювання вогнестійкості сталевої балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням одержана температурна залежність його коефіцієнту теплопровідності була узагальнена і подана у табличній формі. Отримана узагальнена залежність коефіцієнту теплопровідності може бути застосована для гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок для розрахунку температури у даних конструкціях товщиною до 67.5 мм та густини 950 кг/м³.

У статті показано результати дослідження адекватності даних, отриманих за допомогою отриманої залежності. Для цього було проаналізовано критерії прийнятності, що визначаються на основі відносної та абсолютної похибки розрахункових температурних показників. Для аналізу адекватності отриманих даних розраховано значення статистичних критеріїв Кохрена, Стьюдента та Фішера. Показано належну адекватність отриманих розрахункових даних на основі визначеної температурної залежності коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, оскільки проаналізовані статистичні критерії, які були визначені при порівнянні розрахункових та експериментальних даних, не перевищують табличних значень.

Ключові слова: теплофізичні характеристики, коефіцієнт теплопровідності, сталеві балки, гіпсокартонне вогнезахисне облицювання, випробування на вогнестійкість.

RESEARCH ON THE THERMAL PROPERTIES OF GYPSUM PLASTERBOARD CLADDING OF STEEL BEAMS UNDER FIRE CONDITIONS

N. Zaika¹

¹National University of Civil Defence of Ukraine

Abstract: The work is devoted to solving the urgent scientific and technical problem of improving the calculation method for determining temperature indicators in steel beams with gypsum plasterboard fireproof cladding under conditions of thermal impact of fire, necessary for assessing the fire resistance of such beams. As a result of the conducted research, data were obtained on the thermal characteristics of gypsum plasterboard fireproof cladding of steel beams, which are part of the initial data for thermal calculation.

The main thermal characteristic of gypsum plasterboard fireproof cladding that was studied was the temperature dependence of its thermal conductivity coefficient at constant values of density and



heat capacity. This dependence was determined on the basis of temperature measurement data during fire tests of samples of fragments of steel beams.

For the practical implementation of the thermal calculation for assessing the fire resistance of a steel beam with gypsum plasterboard fireproof cladding, the obtained temperature dependence of its thermal conductivity coefficient was summarized and presented in tabular form. The obtained generalized dependence of the thermal conductivity coefficient can be applied for gypsum board fireproof cladding of steel beams to calculate the temperature in these structures with a thickness of up to 67.5 mm and a density of 950 kg/m^3 .

The article shows the results of a study of the adequacy of the data obtained using the obtained dependence. For this purpose, the acceptance criteria were analyzed, which are determined on the basis of the relative and absolute error of the calculated temperature indicators. To analyze the adequacy of the obtained data, the values of the Cochran, Student and Fisher statistical criteria were calculated. The proper adequacy of the obtained calculated data based on the determined temperature dependence of the thermal conductivity coefficient of gypsum board fireproof cladding is shown, since the analyzed statistical criteria, which were determined when comparing the calculated and experimental data, do not exceed the tabular values.

Keywords: fire, thermophysical characteristics, thermal conductivity coefficient, steel beams, gypsum plasterboard cladding, fire resistance testing.

1 ВСТУП

Сталеві балки є широко застосовною у сучасному будівництві конструктивними елементами. При цьому, широкого використання зазнали сталеві балки у каркасах будівель швидкого споруджування. Це будівлі промислових та сільськогосподарських об'єктів (технологічні цехи, склади та сховища, елеватори та зерносховища, теплиці та птахоферми), будівлі транспортних підприємств, виставково-розважальні комплекси та фізкультурно-оздоровчі об'єкти, торговельні комплекси, адміністративно-громадські будівлі, тощо.

Головним недоліком сталевих балок є їхня низька вогнестійкість. Висока теплопровідність сталі та відносно малі габарити перерізів сталевих балок є причиною їхнього швидкого нагрівання. Нагрівання сталевих балок до температури від 450 °C до 650 °C при діючих механічних навантаженнях є причиною нарощення пластичних деформацій, є для них руйнівними [1]. У більшості випадків такий стан спостерігається при тривалості 15-20 хв впливу стандартного температурного режиму пожежі, що, переважно, є недостатнім для відповідності сталевих балок вимогам щодо їхньої вогнестійкості. Для приведення у відповідність сталевих балок вимогам щодо їхньої вогнестійкості застосовують вогнезахисні системи.

Ефективними засобами для забезпечення відповідності сталевих балок вимогам щодо вогнестійкості є застосування вогнезахисних облицювань, у тому числі, гіпсокартонного вогнезахисного облицювання. Переваги їхнього використання зумовлене продуктивністю, монтажних операцій, порівняно невеликою вагою, невеликою вартістю і високими теплоізолювальними властивостями.

Для оцінювання вогнестійкості сталевих балок існує два основних підходи – експериментальний за методом вогневих випробувань та розрахунково-теоретичний. Вимоги щодо проведенні оцінювання вогнестійкості сталевих балок та вогнезахисної здатності пориттів експериментальними методами описані у стандарті [2]. Даний підхід є трудозатратним та вартісним. Альтернативою до використання експериментальних методів є застосування розрахункових методів. Настанови щодо здійснення розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок із вогнезахистом надаються у нормах [3].

З огляду на це, дослідження з питань вогнестійкості сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням є актуальними.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Дослідженням коефіцієнту теплопровідності різних вогнезахисних і будівельних матеріалів присвячено серію експериментальних і теоретичних робіт [4–16].

Робота [4] містить описання чотирьох варіантів оцінювання вогнезахисних властивостей облицювання сталевих балок. Там також описано різні варіанти застосування незахищених та захищених сталевих балок при залученні методу геометричного середнього аналітичного ранжування. У рамках цієї системи не розглянуто застосування гіпсокартонного облицювання в якості вогнезахисних засобів.

Робота [5] містить результати досліджень реальної поведінки сталевих балок при впливі пожежі. Проте дана робота не містить даних щодо поведінки сталевих балок із вогнезахисним гіпсокартонним облицюванням.

У роботі [6] наведено дані щодо випробування сталевих балок із спучувальними захисними покриттями. Досліди були виконані на обладнанні лабораторії Національної пожежної служби Італії. Проте у даних дослідженнях недостатньо приділено уваги випробуванням сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Робота [7] присвячено вивчення теплового впливу пожежі на експандований вермикуліт як модифікований наповнювач для збільшення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів. Проте у даній роботі недостатньо уваги приділено гіпсокартонним плитам як вогнезахисному засобу або елементу вогнезахисної системи сталевих балок.

Робота [8] містить систематизовані дані щодо проектування вогнезахисних сталевих балок за бразильською системою стандартів. Серед таких засобів пропонується використання облицювання гіпсокартонними плитами. Проте, у даній роботі не наведено вимог щодо конструктивних даних вогнезахисного облицювання такого типу.

У дослідженні [9] виконано порівняння результатів експериментальних досліджень та розрахункових даних щодо температури всередині вогнезахисних сталевих конструкцій в умовах пожежі за міжнародними рекомендаціями. Проте, дана робота містить обмежену кількість даних щодо верифікації наведених моделей.

Робота [10] присвячена комплексним хімічним дослідженням впливу хімічного складу в'язучих на поліпшення вогнезахисних властивостей вермикулітних та гіпсових плит. Проте, у даній роботі не приділено такий вплив на значення коефіцієнту теплопровідності і його зміну у залежності від температури нагрівання.

Результати досліджень, що наведені у роботі [11] описують вогнезахисні властивості полімерних покриттів сталевих балок. Випробування проводились при стандартному температурному режимі пожежі і на їхній основі було встановлено взаємозв'язок між їхніми конструктивними параметрами та межею вогнестійкості сталевих балок. Проте дані дослідження не містять даних щодо методик вивчення їхніх теплофізичних параметрів.

Робота [12] містить дані досліджень вогнезахисного покриття для сталевих балок на основі епоксидної смоли. Але наведені результати не порівнювалися з ефективністю інших вогнезахисних засобів, зокрема на основі гіпсокартонних плит.

Результати експериментальних, числових та теоретичних досліджень поведінки балок із вогнезахисним облицюванням описані у роботі [13]. Досліджено температурні показники нагрівання сталевих балок. В той же час питання вогнезахисту на основі гіпсокартонних плит таких балок не розглядалось.

У роботі [14] проаналізовано сучасні підходи до розрахункового оцінювання вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним облицюванням. При цьому було запропоновано застосовувати удосконалений розрахунковий метод. Проте порівняльний аналіз його ефективності порівняно з іншими методами не виконувалося.

Результати, наведені у роботі [15], дозволяють прослідкувати залежність величини межі вогнестійкості сталевих балок від розкиду температури на їхній обігрівній поверхні. Робота [16] містить дані щодо впливу застосування різних температурних режимів пожежі відмінні від стандартного на вогнестійкість сталевих балок із вогнезахисним облицюванням. Проте залишились без уваги питання впливу таких режимів на сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Загалом можна зазначити, що дослідження, спрямовані на вивчення властивостей гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок як комплексу початкових даних для вирішення задачі розрахункового оцінювання їх вогнестійкості є актуальними.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є дослідження теплофізичних характеристик гіпсокартонного вогнезахисного облицювання фрагментів сталевих балок підданих вогневим випробуванням в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- визначити коефіцієнт теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання на основі температурних вимірювань, отриманих під час випробувань фрагментів сталевих балок із даним типом вогнезахисного облицювання.
- визначити температурну залежність коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання для розрахунку температури у сталевих балок із даним типом вогнезахисту в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.
- визначити температурний режим нагрівання сталеві балки із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі із застосуванням отриманої залежності коефіцієнта теплопровідності даного облицювання.
- дослідити адекватність розрахункових показників температури для фрагментів сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі на основі виявленої.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження було використано результати вогневих випробувань зразків, конструктивна схема яких представлена на рис. 1.

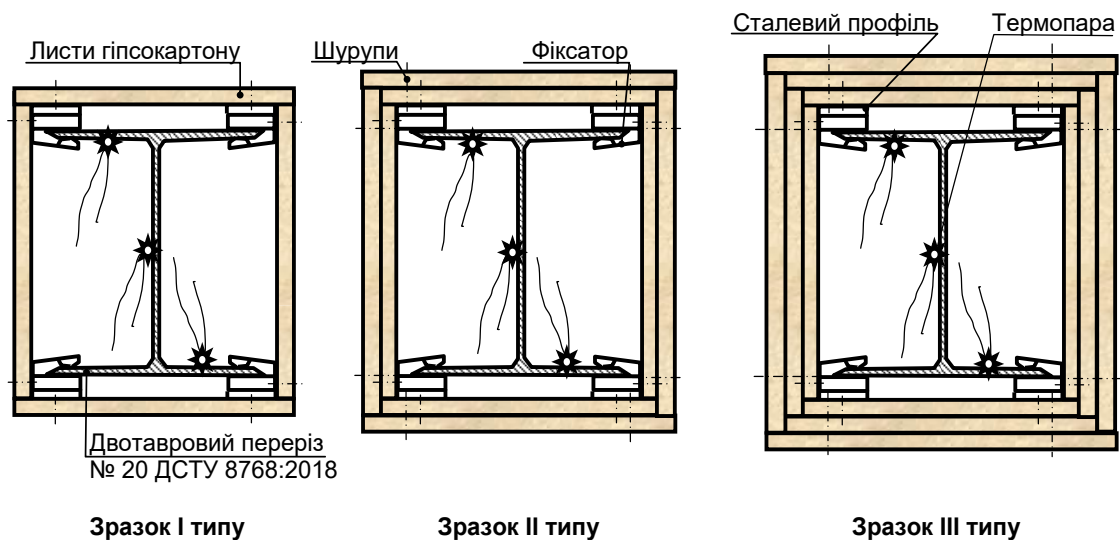


Рис. 1. Конструктивні схеми перерізів зразків для випробування

Для вивчення властивостей гіпсокартонних плит в умовах нагріву було передбачене вогнезахисне облицювання на основі листів з гіпсокартону вогнестійкого виробництва фірми «KNAUF (Україна)» розмірами 1200×2500 мм товщиною 12.5 мм, виготовлених за вимогами ТУУ Ст. 2.7 24577862.001 98.

Сталеві зразки із вогнезахисним облицюванням виготовлені у трьох модифікаціях: одно-, дво- та трьохшаровому виконанні. Для фіксації гіпсокартонного облицювання на

сталевому зразку були використані комплекти кріпильних деталей та сталевого профілю ПП 60/27 виробництва фірми «KNAUF (Україна)» табл. 1.

Таблиця 1

Параметри та товщини облицювання на зразках

Профіль зразка	Довжина зразка, l , м	Зведена товщина перерізу, δ , мм	Зведена товщина перерізу, δ_k , мм	Коефіцієнт перерізу A_{st}/V , м ⁻¹	Густина плит, кг/м ³	Товщина облицювання d , мм	Тип зразка
№20	0.95	3,4	4,5	222,2	950	12,5	1
						25	2
						37,5	3

Для інтерпретації результатів вимірювань, отриманих під час вогневих фрагментів сталевих балок з вогнезахисним облицюванням відповідно до [2] застосовується рекурентна формула для визначення приращення коефіцієнту теплопровідності за встановлений проміжок часу, що має вигляд

$$\lambda_{p,t}(t) = \left[d_p \cdot \frac{V}{A} \cdot c_a \rho_a \cdot \left(1 + \frac{\phi}{3}\right) \cdot \frac{1}{(\theta_t - \theta_{a,t}) \Delta t} \right] \cdot \left[\Delta \theta_{a,t} + (e^{10} - 1) \Delta \theta_t \right], \quad (1)$$

де $\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot \frac{d_p A_p}{V}$, $\frac{A_p}{V}$ – коефіцієнт перерізу для сталеві балки, ізолюваних

вогнезахисним матеріалом; c_a – питома теплоємність сталі, що залежить від температури; c_p – питома теплоємність матеріалу, що не залежить від температури; d_p – товщина вогнезахисного матеріалу; $\Delta t \leq 30$ – інтервал (проміжок) часу, для обчислення при значенні Δt більше 30 с, приймається значення рівне 30 с; $\Delta \theta_{a,t}$ – температура сталі в момент часу t ; $\theta_{g,t}$ – температура навколишнього газу в момент часу t ; $\Delta \theta_{g,t}$ – збільшення температури у приміщенні із пожежею за проміжок часу Δt ; λ_p – коефіцієнт теплопровідності вогнезахисної системи; ρ_a густина сталі; $\rho_p = 950$ кг/м³ – густина вогнезахисного матеріалу.

Для використання рівняння (1) використані температурні залежності теплофізичних характеристик сталі [2], які наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Теплофізичні характеристики конструкційної сталі

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(\theta)$, Вт/(м·°С)	Об'ємна питома теплоємність, $c_p(\theta) \cdot \rho$, Дж/(м ³ ·°С)	Густина, кг/м ³
$54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta$ при $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 800^\circ\text{C}$, 27,3 при $\theta > 800^\circ\text{C}$	$425 + 0,773\theta - 1,69 \cdot 10^{-2} \theta^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta^3$ при $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 600^\circ\text{C}$, $666 - 13002/(\theta - 738)$ при $600^\circ\text{C} < \theta \leq 735^\circ\text{C}$, $545 + 17820/(\theta - 731)$ при $735^\circ\text{C} < \theta \leq 900^\circ\text{C}$, 650 при $900^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$	7850

Згідно із рекомендаціями [2, 17] теплоємність вважається сталою і рівна $c_p = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$.

На рис. 2. показані графіки залежності від часу величини середньої температури для кожного із зразків. Величина температури була усереднена за показниками трьох термопар, встановлених на сталевому зразку, як показано на рис. 1. На даних графіках також показані відхилення значень виміряної температури від значення математичного очікування.

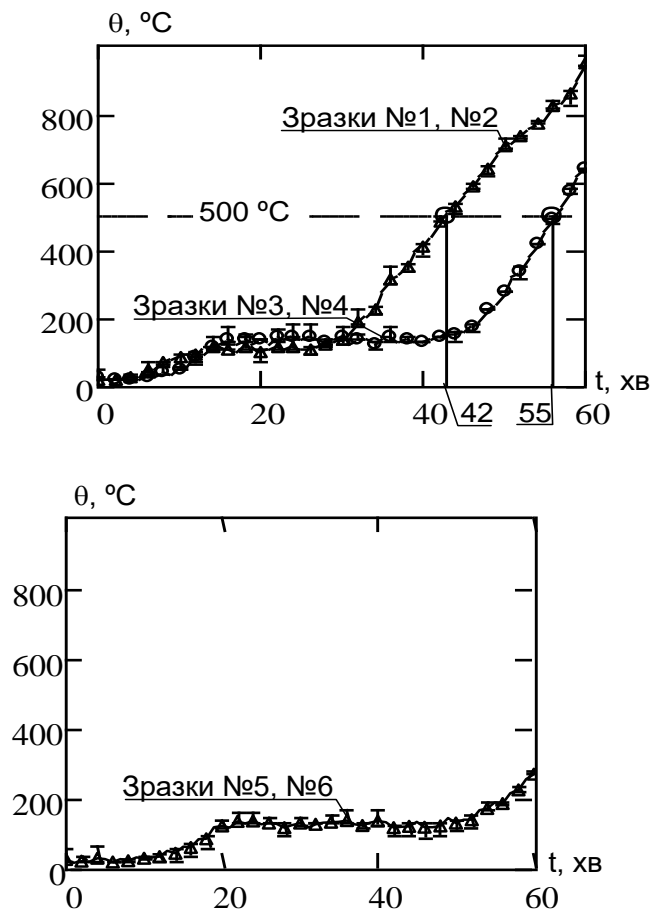


Рис. 2. Криві середньої температури для зразка одного типу усереднені за показниками з трьох термопар встановлених на поверхні сталевого осердя зразків у залежності від часу переробки випробувань

Використовуючи дані, подані у табл. 1, та застосовуючи формулу (1), було виконано обчислення коефіцієнту теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання. Одержані результати показані на рис. 3 у вигляді кривих залежностей коефіцієнту теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання у залежності від часу випробування.

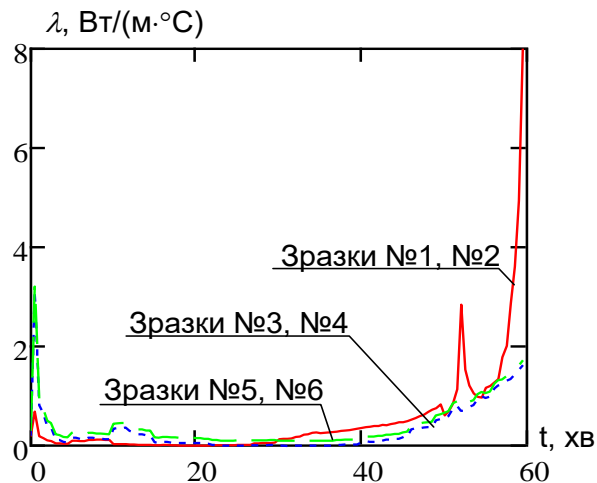


Рис. 3. Криві залежностей коефіцієнту теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання зразків залежно від часу випробування

Криві, показані на рис. 3 мають характерні особливості, що можна прослідкувати на прикладі характеру зміни коефіцієнта теплопровідності при порівнянні товстого та тонкого шару облицювання. Існує помітна відмінність яка проявляється у появі максимуму графіку коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного облицювання малої товщини, і відсутності такого максимуму для зразків із товстішим шаром гіпсокартонного вогнезахисного облицювання. Поява такого максимуму пояснюється тим, що при малій товщині гіпсокартонного облицювання має місце вплив внутрішніх процесів у сталі, що має чіткий максимум теплоємності при досяганні температур при яких спостерігається максимум у гіпсокартонному облицюванні.

При нагріванні всіх зразків із гіпсокартонним вогнезахисним облицювання залежність зміни коефіцієнта теплопровідності має подібний вигляд. Спільною особливістю є достатньо тривалий період збереження величини коефіцієнта теплопровідності на одному рівні. При досягненні більших температур з певного моменту коефіцієнт теплопровідності починає швидко зростати. Це може бути пояснено тим, що випаровується вільна волога у гіпсокартоні, а потім активізуються процеси деструкція гіпсу руйнування самого облицювання.

Також є помітною цікава особливість зміни коефіцієнту теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання товщиною більше за 50 мм відповідних зразків фрагментів сталевих балок, що полягає у досягненні певного мінімуму на початкових стадіях з 30 хв. Вона може бути пояснена тим, що має місце більша кількість вологи, яка дислокується у каркасі гіпсового каменю у зразках, де гіпсокартонне вогнезахисне облицювання має більшу товщину. При нагріванні гіпсокартонного облицювання присутня волога починає випаровуватися і таким чином сповільнює процес нагріву і тим самим впливає на перебіг зміни коефіцієнта теплопровідності, як це можна побачити аналізуючи відповідні криві.

Враховуючи одержані результати, які були обчислені з використанням використаних розрахункових методик, було побудовано графік усередненої залежності величини коефіцієнта теплопровідності від температури. Отриманий графік показаний на рис. 4.

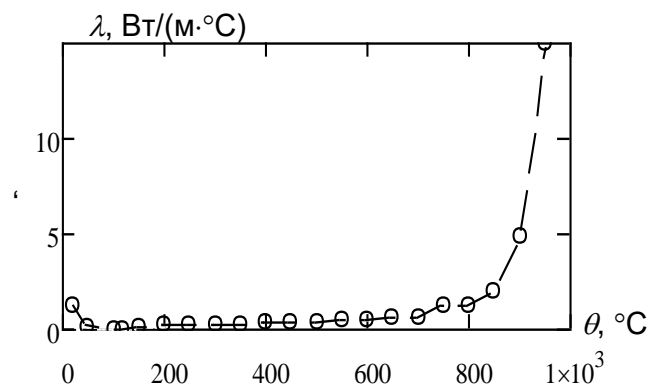


Рис. 4. Усереднена залежність величини коефіцієнта теплопровідності від табличних значень температури для зразків фрагментів сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням

Для обчислень температури нагріву сталевих балок зручно застосовувати залежність коефіцієнта теплопровідності від температури у вигляді табличної форми, яка показана у табл. 3.

Таблиця 3

Таблична форма температурної залежності коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання

Коефіцієнт теплопровідності		Питома теплоємність	Густина, ρ , кг/м ³
θ , °C	$\lambda(\theta)$, Вт/(м·°C)	$c_p(\theta)$, Дж/(кг·°C)	
20	1.2	1000	950
50	0.094		
100	0.011		
150	0.023		
200	0.136		
250	0.2		
300	0.267		
350	0.266		
450	0.294		
500	0.341		
550	0.382	1000	200
600	0.418		
650	0.475		
700	0.553		
750	0.678		
800	0.611		
850	1.212		
900	1.201		
950	2.014		
1000	4.937		
1050	15		

Таким чином, була одержана залежність коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання товщиною до 67.5 мм, що відповідає

попередньо встановленим даним питомої теплоємності та густини гіпсокартону (див. табл. 2)

Використовуючи дані щодо теплофізичних властивостей (див. табл. 3.8) гіпсокартонного вогнезахисного облицювання, що було одержано розрахунковим шляхом, застосовуючи результати вогневих випробувань фрагментів сталевих балок було визначено температурні режими прогрівання випробуваних осердя випробовуваних. Для проведення обчислень температурних режимів нагріву зразків було застосовано рівняння

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p}{V d_p c_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \cdot \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t}. \quad (2)$$

Результати обчислень наведені у вигляді кривих температурних режимів нагріву сталевих осердя зарзків разом із кривим, що одержані експериментальним шляхом. Побудовані криві температурних режимів показані на рис. 5

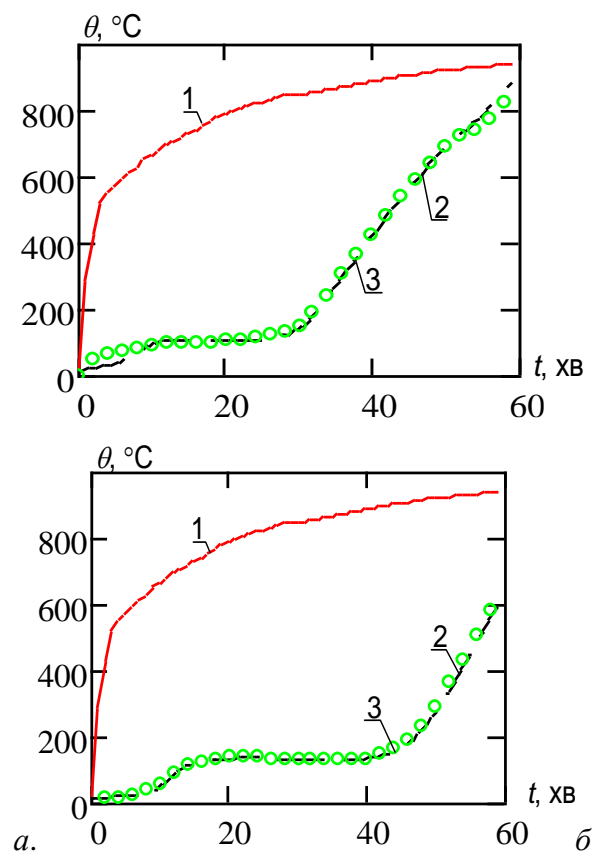


Рис. 5. Графіки температурних режимів нагріву сталевих осердя зразків балок №1, №2 (а) та зразків №3, №4 (б) з гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням : 1 – стандартний температурний режим пожежі; 2 - експериментальні дані; 3 - розрахункові дані

Криві на рис. 5 вказують на невелику розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними, які одержані за узагальненою температурною залежністю коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

З метою вивчення достовірності результатів обчислення температурних значень та критеріїв прийнятності результатів розрахунку параметрів теплового впливу пожежі на зразки фрагментів сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням було визначено відповідні статистичні показники отриманих розрахункових даних. Обчислені показники середніх величин абсолютного відхилення, відносного відхилення, середньоквадратичного відхилення при порівняльному аналізі експериментальних і розрахункових даних для досліджуваних зразків зведені до табл. 4.

Таблиця 4

Абсолютні, відносні та середньоквадратичні при порівнянні розрахункових та експериментальних показників

№ зразка	Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньоквадратичні відхилення, °С
1	40.796	12.89	18.27
2	37.673	12.682	9.655
3	30.345	9.082	6.09
4	39.271	14.505	17.24
5	15.07	4.247	3.915
6	25.302	8.3	9.619
Середні значення	31.41	10.284	10.798

Статистичні показники, показані у табл. 4 вказують на те, що похибка, отримана шляхом порівняльного аналізу розрахункових та експериментальних температурних даних у зразках фрагментів сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням суттєвого впливу на точність розрахунків не має, оскільки середнє значення відносної похибки не перевищує 10.3 %, а значення середньоквадратичного відхилення є не вище 10.8 °С. Це дає змогу стверджувати, що за проведеним аналізом статистичних параметрів обчислених даних щодо температури одержана залежність коефіцієнта теплопровідності може бути застосована для розрахунків температури нагрівання сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням.

Дані щодо розрахованих статистичних критеріїв для температурних показників відповідних випробуваних зразків подані у табл. 5.

Таблиця 5

Статистичні критерії щодо розрахованих температурних даних для випробуваних зразків сталевих балок із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням

№ зразка	Критерій Кохрена	Критерій Стьюдента	Критерій Фішера
1	0.411	0.703	0.904
2	0.396	0.641	0.907
3	0.624	0.659	0.986
4	0.578	0.68	0.927
5	0.85	0.876	0.959
6	0.684	0.823	0.931
7	0.549	0.656	0.886
8	0.584	0.72	0.928

Отримані дані у табл. 5 показують, що статистичні критерії, які характеризують розкид відхилень температур у досліджуваних зразках не перевищують табличних значень. Це значить, що одержана залежність коефіцієнта теплопровідності від температури може бути застосована як загальна для розрахунку температур нагрівання сталевих балок із гіпсокартонних вогнезахисним облицюванням.

6 ВИСНОВКИ

1. Одержана узагальнена залежність коефіцієнта теплопровідності гіпсокартонного вогнезахисного облицювання від температури у табличній формі, яка може бути застосована для обчислення температури у сталевих балках із даним типом вогнезахисту у інтервалі значень його товщини до 67.5 мм при значенні питомої теплоємності 1000 Дж/(кг·°C) та густини 950 кг/м³.

2. Показано, що одержана залежність коефіцієнта теплопровідності від температури може бути застосована як загальна для розрахунку температурних показників при нагріванні у сталевих балок за стандартною температурною кривою із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням, оскільки величина відносна похибка не перевищує 10.3 %, а величина середньоквадратичного відхилення не перевищує 10.8 °C.

3. Показано що статистичні критерії адекватності Кохрена, Стьюдента та Фішера, обчислених для результатів розрахунку температури у сталевих балках із гіпсокартонним вогнезахисним облицюванням при порівняльному аналізі розрахункових та експериментальних даних мають значення не більше відповідно 0.7, 0.88 та 0.96 і не є більшими за табличні значення. Це означає, що результати обчислень при застосуванні отриманої залежності коефіцієнта теплопровідності від температури є адекватними.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автор не має відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

Література

1. Хоменко О. Г. Сталеві конструкції у будівництві. Глухів, 2018: Підручник – 347с.
2. ДСТУ EN 13381-8:2022 Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 8. Реактивні вогнезахисні матеріали для сталевих конструкцій (EN 13381-8:2013, IDT).
3. EN 1993-1-2: Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.
4. Akaa, O. U., Abu, A., Spearpoint, M., & Giovinazzi, S. (2016). A group-AHP decision analysis for the selection of applied fire protection to steel structures. *Fire Safety Journal*, 86, 95-105.
5. Wang, Y. C., & Kodur, V. K. R. (2000). Research toward use of unprotected steel structures. *Journal of structural engineering*, 126(12), 1442-1450.
6. Bilotta, A., de Silva, D., & Nigro, E. (2016). Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures. *Construction and Building Materials*, 121, 410-422.
7. Xue, Y., Zhang, S., & Yang, W. (2015). Influence of expanded vermiculite on fire protection of intumescent fireproof coatings for steel structures. *Journal of Coatings Technology and Research*, 12(2), 357-364.
8. E Silva, V. P., & Fakury, R. H. (2002). Brazilian standards for steel structures fire design. *Fire Safety Journal*, 37(2), 217-227.
9. E. Silva, V. P. (2005). Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical

- process—a simple derivation. *Engineering Structures*, 27(14), 2036-2043.
10. Mohammadi, S., Shariatpanahi, H., & Taromi, F. A. (2015). Influence of hybrid functionalized graphite nanoplatelets-tripolyphosphate on improvement in fire protection of intumescent fire resistive coating for steel structures. *Polymer Degradation and Stability*, 120, 135-148.
 11. Watolla, M. B., Gluth, G., Sturm, P., Rickard, W. D. A., Krüger, S., & Schartel, B. (2017). Intumescent geopolymer-bound coatings for fire protection of steel.
 12. Yew, M. C., & Ramli Sulong, N. H. (2011). Effect of epoxy binder on fire protection and bonding strength of intumescent fire protective coatings for steel. In *Advanced Materials Research* (Vol. 168, pp. 1228-1232). Trans Tech Publications Ltd.
 13. Gardner, L. (2007). Stainless steel structures in fire. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 160(3), 129-138.
 14. Guoqiang, L. I. (2000). The development of fire-resistant design method for steel structures [J]. *Steel Construction*, 3.
 15. Nuianzin, O., Tyshchenko, O., Zhartovskiy, S., Zaika, P., & Peregin, A. (2019, December). The research of carrying capacity of reinforced concrete walls under uneven warming. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 708, No. 1, p. 012063). IOP Publishing.
 16. Nuianzin, O., Pozdieiev, S., Hora, V., Shvydenko, A., & Samchenko, T. (2018). Experimental study of temperature mode of a fire in a cable tunnel. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, (3 (10)), 21-27.
 17. EN 1991-1-2:2012: Eurocode 1. Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels.
 18. Франчук А.У. Таблиці теплотехнічних показників будівельних матеріалів, М.: НДІ будівельної фізики, 1969 - 142 с.

References

1. Khomenko, O. (2018) *Steel structures in construction*. Textbook – 347с.
2. DSTU EN 13381-8:2022 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 8: Applied reactive protection to steel members
3. EN 1993-1-2:2005 (2004) Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels.
4. Akaa, O. U., Abu, A., Spearpoint, M., & Giovinazzi, S. (2016). A group-AHP decision analysis for the selection of applied fire protection to steel structures. *Fire Safety Journal*, 86, 95-105.
5. Wang, Y. C., & Kodur, V. K. R. (2000). Research toward use of unprotected steel structures. *Journal of structural engineering*, 126(12), 1442-1450.
6. Bilotta, A., de Silva, D., & Nigro, E. (2016). Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures. *Construction and Building Materials*, 121, 410-422.
7. Xue, Y., Zhang, S., & Yang, W. (2015). Influence of expanded vermiculite on fire protection of intumescent fireproof coatings for steel structures. *Journal of Coatings Technology and Research*, 12(2), 357-364.
8. e Silva, V. P., & Fakury, R. H. (2002). Brazilian standards for steel structures fire design. *Fire Safety Journal*, 37(2), 217-227.
9. e Silva, V. P. (2005). Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process—a simple derivation. *Engineering Structures*, 27(14), 2036-2043.
10. Mohammadi, S., Shariatpanahi, H., & Taromi, F. A. (2015). Influence of hybrid functionalized graphite nanoplatelets-tripolyphosphate on improvement in fire protection of intumescent fire resistive coating for steel structures. *Polymer Degradation and Stability*, 120, 135-148.
11. Watolla, M. B., Gluth, G., Sturm, P., Rickard, W. D. A., Krüger, S., & Schartel, B. (2017). Intumescent geopolymer-bound coatings for fire protection of steel.
12. Yew, M. C., & Ramli Sulong, N. H. (2011). Effect of epoxy binder on fire protection and bonding strength of intumescent fire protective coatings for steel. In *Advanced Materials Research* (Vol. 168, pp. 1228-1232). Trans Tech Publications Ltd.
13. Gardner, L. (2007). Stainless steel structures in fire. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 160(3), 129-138.
14. Guoqiang, L. I. (2000). The development of fire-resistant design method for steel structures

- [J]. Steel Construction, 3.
15. Nuianzin, O., Tyshchenko, O., Zhartovskyi, S., Zaika, P., & Peregin, A. (2019, December). The research of carrying capacity of reinforced concrete walls under uneven warming. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 708, No. 1, p. 012063). IOP Publishing.
 16. Nuianzin, O., Pozdieiev, S., Hora, V., Shvydenko, A., & Samchenko, T. (2018). Experimental study of temperature mode of a fire in a cable tunnel. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, (3 (10)), 21-27.
 17. EN 1991-1-2:2002 (2002) Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels.
 18. Franchuk, A. (1969). Tables of thermal indicators of building materials, M. Research Institute of Building Physics, - 142 p.

Заїка Наталя Петрівна

Національний університет цивільного захисту України,
ад'юнкт,
вул. Онопрієнка, 8, Черкаси, Україна, 18034
natali2194@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8757-5709

Для посилань:

Заїка Н. П. Дослідження теплових властивостей гіпсокартонного вогнезахисного облицювання сталевих балок в умовах пожежі. Механіка та математичні методи, 2025.Т. VII. № 1. с. 138–151

For references:

N. Zaika. (2025). Research on the thermal properties of gypsum plasterboard cladding of steel beams under fire conditions . Mechanics and mathematical methods. VII (1). 138–151.

УДК 614.841

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ

Даник Ю. О.¹, Кіріченко Д. О.²

¹Національний університет цивільного захисту України

²Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація: У статті особлива увага звертається на катастрофи, спричинені ракетними обстрілами, техногенними аваріями та природними пожежами, які мають значні людські та матеріальні втрати. Виявлено основні фактори виникнення масштабних пожеж, значних матеріальних збитків та екологічних наслідків, визначені людські та матеріальні збитки. Також проаналізовано залучення сил та засобів ДСНС України для ліквідації пожеж і надзвичайних ситуацій.

Пропонуються нові підходи до забезпечення пожежної безпеки, зокрема через використання сучасних технологій, таких як штучний інтелект (ШІ). ШІ має значний потенціал для поліпшення кожного етапу роботи з пожежами: від прогнозування та раннього виявлення до управління ресурсами та відновлення територій після надзвичайних ситуацій. Використання ШІ дозволяє скоротити час реакції, підвищити точність аналізу ризиків та оптимізувати управління евакуацією. Завдяки інтеграції цих технологій можливе створення більш безпечних і стійких систем, які сприяють мінімізації збитків та підвищенню надійності реагування на пожежі.

В роботі проведений аналіз вітчизняних та зарубіжних досліджень, який підтверджує ефективність застосування технологій штучного інтелекту для моніторингу, аналізу та прогнозування надзвичайних ситуацій. Зокрема, такі технології, як цифрові двійники, алгоритми машинного навчання дозволяють оперативно реагувати на пожежі, покращувати управління рятувальними операціями та мінімізувати ризики для населення.

Програмні комплекси з використанням штучного інтелекту надають можливості для прогнозування ризиків пожеж, швидкого виявлення займання, оптимізації ресурсів під час гасіння та планування заходів контролю. Також вони забезпечують аналіз наслідків пожеж та сприяють розробці стратегій для запобігання майбутнім загрозам. Їхнє використання охоплює всі етапи роботи з пожежами, від протипожежних заходів до відновлення територій. Інтеграції подібних систем у вітчизняну практику для підвищення рівня пожежної безпеки. Оцінено потенціал інтеграції подібних систем у вітчизняну практику з метою підвищення рівня пожежної безпеки. Інтеграція ШІ дозволяє оперативно обробляти великі обсяги даних, забезпечуючи точність та ефективність аналізу, що є критично важливим для своєчасного реагування на надзвичайні ситуації.

Ключові слова: пожежа, надзвичайна ситуація, програмні комплекси, штучний інтелект, пожежна безпека.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS TO SOLVING FIRE SAFETY PROBLEMS

Yu. Danyk¹, D. Kirichenko²

¹National University of Civil Defence of Ukraine

²Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract: The popularity of translucent materials in construction, especially in high-rise buildings, creates challenges for improving approaches to fire safety. Translucent designs have a limited. During a fire, they can quickly heat up, crack or even collapse, which helps the fire to spread to other parts of the building and increases the speed of fire spread.



Practical methods and methods of limiting the spread of fire on building facades are considered in the work, including the use of fire eaves, protective screens made of fire-resistant material, limiting the area of the window opening, as well as the use of water irrigation. Water irrigation is an effective method of extinguishing fire and cooling facade elements, but its parameters, such as working pressure, water flow, location, etc., require careful research to achieve maximum efficiency.

The purpose of this work is to use the PyroSim software complex to investigate the effectiveness of sprinklers for the protection of transparent structures on the facade of high-rise buildings and to determine their main parameters.

With the help of PyroSim, a detailed three-dimensional model was created, which takes into account the complex geometric shapes of the building and the impact of fire protection systems, taking into account the features of translucent facades. In the course of research, structural elements that can affect the spread of fire and smoke are also taken into account, namely the characteristics of materials, fire load, installation of window openings. PyroSim, simulating the spread of a fire, made it possible to take into account heat and smoke flows, convective effects occurring during a fire, as well as the interaction of sprinklers with the heat load.

The results of such modeling can be used to optimize the design of fire protection systems and ensure the compliance of building regulations with fire safety issues. In particular, modeling allows you to determine the most effective ways to place sprinklers, taking into account the specific conditions and structural features of the building. Thanks to this, it is possible not only to increase the level of protection of buildings against fires, but also to minimize the costs of installing and maintaining fire systems.

Keywords: fire, simulation, destruction, sprinkler, PyroSim.

1 ВСТУП

Зростання кількості та інтенсивності пожеж у світі, викликане змінами клімату, створює нові виклики у сфері пожежної безпеки. Яскравим прикладом прояву небезпеки є лісові пожежі в Луганській області (Україна, Луганська область, рис. 1). У вересні 2020 року на Луганщині лісові пожежі охопили кілька районів. Унаслідок цієї екологічної катастрофи загинули 5 осіб, 109 отримали поранення, а понад 3000 мешканців були евакуйовані. Загальні матеріальні збитки оцінили у понад 12 мільйонів гривень. За інформацією Кабінету Міністрів України, загальна площа пожежі більше 20 тисяч гектарів [1].



Рис.1. Пожежі в Луганській області, 2020 рік, Україна

Було виявлено кілька причин виникнення та поширення пожеж:

- порушення правил протипожежної безпеки у лісових масивах;
- можливі навмисні підпали (підозрюється людський фактор);
- несприятливі погодні умови, зокрема сильний вітер до 25 м/с та висока температура;
- недостатня кількість ресурсів для оперативного реагування на надзвичайну ситуацію.

Це привело до виникнення масштабних пожеж на Луганщині, які швидко поширювалися через погоду та завдали значної шкоди природі, спричинивши людські жертви та значні матеріальні збитки.

Також, виникали лісові пожежі в Чорнобильській зоні відчуження (Україна, Київська область, рис. 2). Пожежі в зоні відчуження охопили понад 11 500 гектарів, знищивши лісові масиви, покинуті населені пункти та інфраструктуру. До гасіння було залучено понад 200 чоловік та 64 одиниць техніки [2].



Рис.2. Пожежі в Чорнобильській зоні, 2020 рік, Україна

Було виявлено кілька причин виникнення та поширення пожеж:

- за даними Національної поліції України, пожежі були спричинені умисним підпалом сухої рослинності в окремих районах, що стало основною причиною виникнення пожежі;
- суха погода та сильний вітер сприяли швидкому поширенню вогню;
- велика площа зони відчуження та важкодоступність окремих ділянок ускладнили своєчасне виявлення та ліквідацію пожеж на ранніх стадіях.

В Каліфорнії (США, Каліфорнія, рис. 3) було зафіксовано понад 8 600 пожеж, які охопили територію площею близько 1,7 мільйона гектарів. Унаслідок катастрофи загинуло щонайменше 31 особа, понад 100 000 мешканців були змушені евакуюватися, та знищено понад 10 000 будівель, включаючи житлові будинки та інфраструктуру [3].



Рис.3. Лісові пожежі в Каліфорнії, 2020 рік, США

Було виявлено чотири причин виникнення та поширення пожеж:

- аномальна спека та посуха, що створили сприятливі умови для розповсюдження вогню;
- близько 12 000 ударів блискавки за короткий період, що спричинили численні загоряння;
- недбалість або навмисні дії людей, які призвели до виникнення осередків вогню;
- недостатня готовність систем раннього виявлення пожеж до таких пожеж.

Влітку 2021 року сталися масштабні лісові пожежі в Каліфорнії (США, штат Каліфорнія, рис. 4). Пожежі охопили величезні території, знищивши понад 470 тисяч гектарів лісу, сотні будинків та інфраструктуру. Унаслідок катастрофи загинули кілька

людей, десятки отримали поранення, а тисячі мешканців були змушені евакуюватися [4].



Рис. 4. Лісові пожежі в Каліфорнії, 2021 рік, США

Було виявлено кілька основних причин виникнення пожеж:

- тривала посуха та аномальна спека, що створили сприятливі умови для займання;
- сильний вітер, який сприяв швидкому поширенню вогню;
- неналежний стан лісів, включаючи велику кількість сухої;
- збільшення кількості людських факторів, таких як необережне поводження з вогнем.

Підрив Каховської ГЕС (Україна, Херсонська область, м. Нова Каховка, рис. 5) Це трапилося 6 червня 2023 року, коли російські війська здійснили підрив греблі Каховської гідроелектростанції. Внаслідок цього сталося затоплення значної частини Херсонської області, зокрема населених пунктів, сільськогосподарських угідь та природних об'єктів. Станом на червень 2023 року було підтверджено загибель 21 особи. Кількість зниклих безвісти залишається невідомою. Близько 17 тисяч осіб з підконтрольних територій України було евакуйовано [5].



Рис. 5. Наслідки підриву Каховської ГЕС, червень 2023 року, Україна

Причиною руйнування стало замінування та підрив греблі російськими окупаційними військами, які контролювали об'єкт на той момент. Це призвело до підняття рівня води до критичних значень та знищення інфраструктури в багатьох населених пунктах, загибелі людей та руйнування екосистеми та забруднення ґрунтів.

Лісові пожежі в Австралії (штати Новий Південний Уельс, Вікторія та Західна Австралія, рис. 6). У січні 2024 року вогонь охопив значні території. Унаслідок пожеж загинули щонайменше 33 людини, було знищено понад 2500 будинків, а мільйони

диких тварин, зокрема коали та кенгуру, загинули через поширення вогню. Також пожежа знищивши понад 6 мільйонів гектарів лісів та чагарників [6].



Рис. 6. Наслідки лісових пожеж в Австралії, січень 2024 рік

Було виявлено такі причини пожеж:

- високі температури у штатах, понад 45°C;
- тривала посуха, яка зробила рослинність легкозаймистою;
- пориви вітру, що сприяло швидкому поширенню вогню;
- недбале поводження із відкритим вогнем.

Традиційні методи боротьби з пожежами виявляються дедалі менш ефективними в умовах змін клімату, зокрема через збільшення масштабів та швидкості їх поширення. Це створює необхідність у розробці нових підходів до забезпечення пожежної безпеки, зокрема через використання сучасних технологій, таких як штучний інтелект (ШІ).

Таким чином, актуальною науково-практичною задачею дослідження є проведення аналізу програмних комплексів, які застосовують ШІ, для вирішення задач у сфері пожежної безпеки з метою прогнозування, моніторингу та управління процесами гасіння пожеж.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Штучний інтелект (ШІ) та технології на його основі стали одним з найбільш перспективних напрямків у забезпеченні пожежної безпеки, зокрема у сфері проектування, моніторингу та прогнозування надзвичайних ситуацій. За останнє десятиліття дослідники відзначають значний прогрес у розробці інтелектуальних систем, які сприяють зниженню ризиків виникнення пожеж та підвищенню ефективності реагування на них.

Однією з ключових ініціатив у цьому напрямку є впровадження алгоритмів штучного інтелекту для проектування пожежної безпеки будівель. У роботі [7] запропоновано дорожню карту застосування ШІ для підвищення структурної стійкості будівель, а також впроваджено три концепції: проектування пожежної безпеки з використанням ШІ, цифрові двійники для моніторингу в реальному часі та суперреальне прогнозування (SuRF) еволюції пожеж. Подібні ідеї розвиваються і в роботі [8], де детально описано інтеграцію ШІ в інженерію пожежної безпеки будівель. Ця концепція відображена на рис. 7, який демонструє еволюцію ролі ШІ у забезпеченні пожежної безпеки майбутніх міст. Такий підхід дозволяє ефективніше підготуватися до надзвичайних ситуацій, мінімізувати збитки та прискорити процес відновлення.

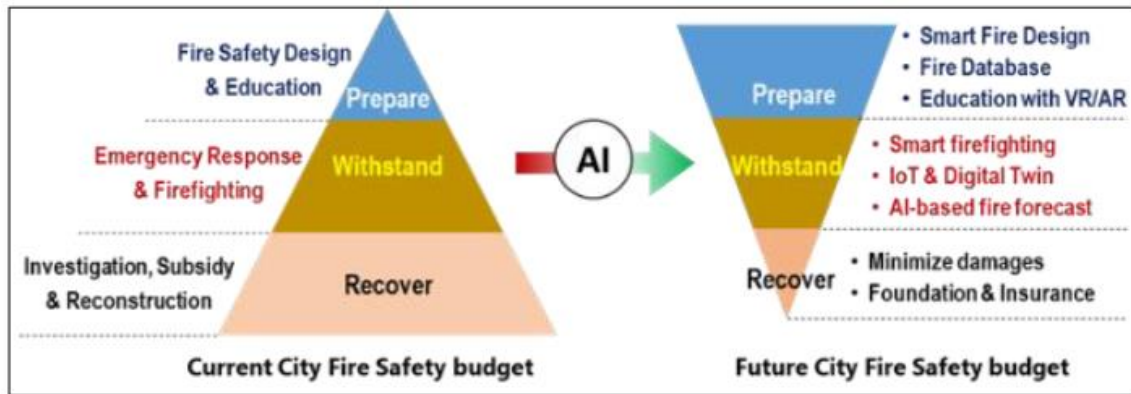


Рис. 7. Роль штучного інтелекту у формуванні пожежної безпеки майбутнього міста

Подібні дослідження підтверджують ефективність цифрових технологій і глибинного навчання. Наприклад, розробка програмного забезпечення IFETool [9] продемонструвала можливість швидкого та точного аналізу параметрів пожежі в складних архітектурних структурах, таких як атріуми. IFETool є інтелектуальним інструментом, що дозволяє моделювати розвиток пожежі, прогнозувати температурні показники, концентрацію шкідливих речовин та видимість диму. Візуалізація інтерфейсу та функціональних можливостей цього інструменту представлена на рис. 8. Завдяки створенню великої числової бази даних пожеж та тренуванню глибинних нейронних мереж, IFETool досягає точності 97% у прогнозуванні основних параметрів пожежі. Це, у свою чергу, дозволяє інженерам значно скоротити час на проєктування безпечних об'єктів, зберігаючи високу якість аналізу.



Рис. 8. Інтерфейс інтелектуального інструменту пожежогасіння IFETool

Особливу увагу привертає метод проєктування пожежної безпеки на основі продуктивності (PBD), який значно вдосконалено завдяки застосуванню ШІ. У

дослідженні [10] було запропоновано інтелектуальну структуру для прогнозування руху диму та доступного безпечного часу евакуації (ASET) в умовах атріуму. Використання транспонованої згорткової нейронної мережі (TCNN) дозволяє зменшити витрати часу та ресурсів на проведення CFD-розрахунків, зберігаючи при цьому точність результатів. Це підтверджує доцільність інтеграції ШІ у сучасне проєктування для підвищення ефективності та надійності систем пожежної безпеки.

У сфері реагування на пожежі значну роль відіграють системи, що забезпечують моніторинг у реальному часі. У роботі [11] описана система цифрового вогню AID-Fire, яка поєднує сенсори Інтернету речей (збір і передача даних), хмарне зберігання даних та алгоритми Conv-LSTM для аналізу просторово-часових характеристик пожежі. Система успішно продемонстрована в реальних умовах, забезпечуючи високу швидкість і точність виявлення пожеж із затримкою менше ніж одна секунда. Візуальна схема архітектури системи AID-Fire (рис. 9) демонструє роботу сенсорів для збору даних, передачу інформації через провідну та бездротову мережі на хмарний сервер, де штучний інтелект аналізує дані та візуалізує результати на інтерфейсі користувача для оперативного моніторингу та реагування на пожежі. Цей підхід дозволяє оперативно реагувати на розвиток надзвичайних ситуацій та ефективно управляти процесом евакуації та рятувальних операцій.

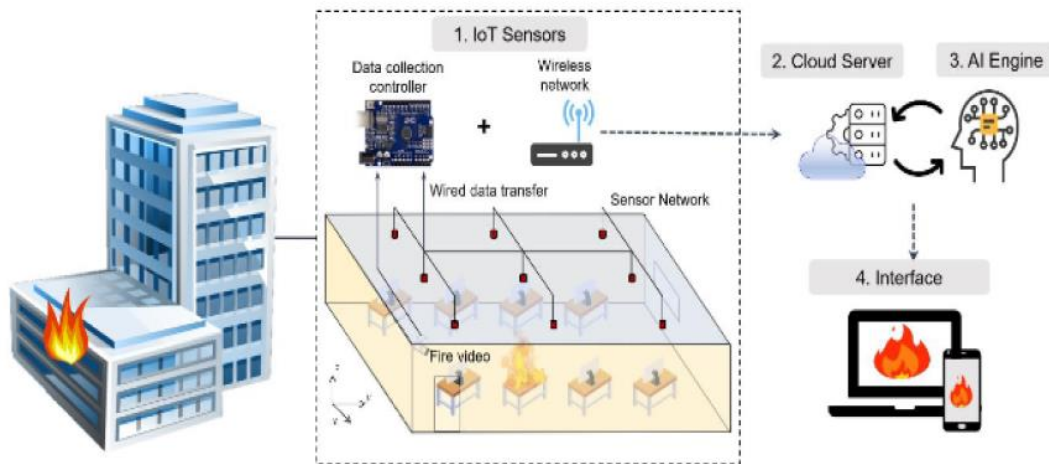


Рис. 9. Архітектура системи штучного інтелекту для цифрового виявлення пожежі (AID-Fire)

Подальші дослідження демонструють перспективи використання ШІ для покращення дій під час пожежного реагування. У роботі [12] запропоновано модель на основі детектора об'єктів YOLOv4 для реального часу, яка дозволяє покращити командування та облік персоналу на місці пожежі. Детектор досягає точності понад 90% при підрахунку кількості пожежних автомобілів і рятувальників за допомогою зображень від камер у пожежних автомобілях, машинах швидкої допомоги чи дронах. Рис. 10 ілюструє ключові етапи оперативного керування рятувальними операціями. Це дослідження демонструє можливість застосування технологій ШІ для оперативного керування рятувальними операціями та підвищення відповідальності персоналу під час надзвичайних ситуацій.

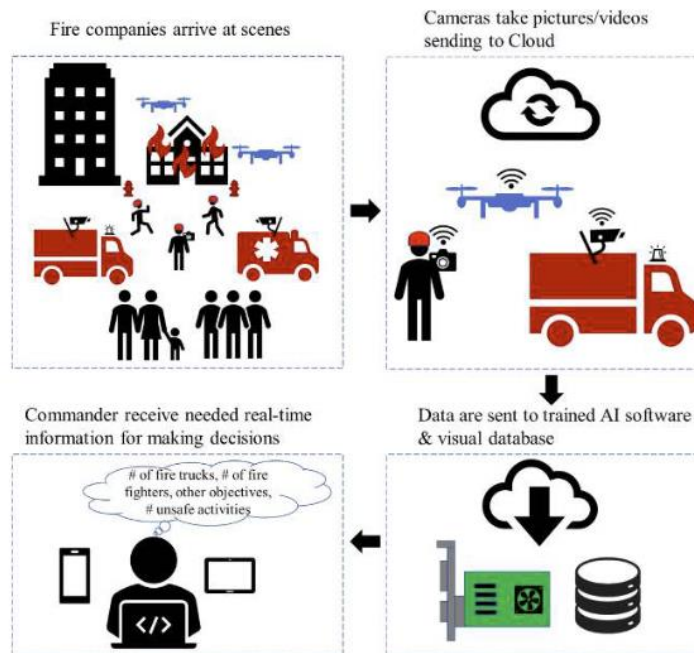


Рис. 10. Процедура управління пожежною безпекою з використанням штучного інтелекту

Ще одне дослідження демонструє схожу перспективу використання інтелектуальних систем для моніторингу пожеж тільки в тунелях. У роботі [13] запропоновано інтелектуальну систему пожежогасіння на основі цифрового двійника, яка включає чотири основні компоненти: сенсорну мережу, сервер даних, штучний інтелект для обробки інформації та інтерфейс користувача для візуалізації результатів. На рис. 11 представлено архітектуру системи, де сенсорна мережа збирає дані про температуру, видимість і рівень CO у реальному часі, а сервер передає ці дані для обробки ШІ. Штучний інтелект аналізує отриману інформацію, визначаючи місце та розмір пожежі з точністю 98%. Дані візуалізуються на користувацькому інтерфейсі для координації евакуації та рятувальних операцій із затримкою лише 1 секунду.

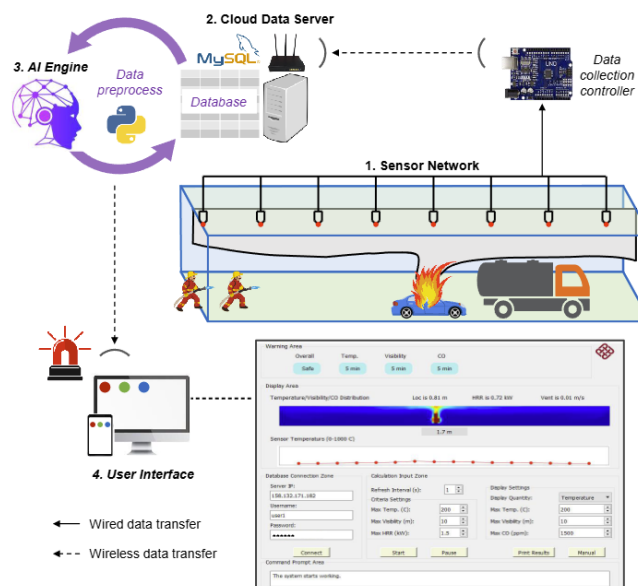


Рис. 11. Архітектура інтелектуальної системи пожежогасіння на основі цифрового двійника для моніторингу пожеж у тунелях

Останніми десятиліттями зріс попит на висотні будівлі для задоволення потреб сучасної урбанізації. Однак будівельні виклики та велике пожежне навантаження призвели до частих пожеж, які спричинили значні втрати людських життів і майна. Як зазначають у [14], важливо зрозуміти фізику поширення вогню та диму у висотних будівлях і впроваджувати заходи, що дозволяють запобігати пожежам у майбутньому. Особливу увагу автори приділяють фасадам, аналізуючи їхню роль у розвитку пожеж. Важливу частину їхнього дослідження займає використання технологій ШІ та глибокого навчання для моделювання сценаріїв пожежі, а також для раннього попередження та оцінки ризиків. Архітекторам і інженерам це дозволяє створювати ефективніші системи пожежної безпеки, що відповідають цілям сталого розвитку. На рис. 12 представлено архітектуру системи моделювання пожеж за допомогою глибокого навчання, яка дозволяє аналізувати поведінку пожеж у висотних будівлях.

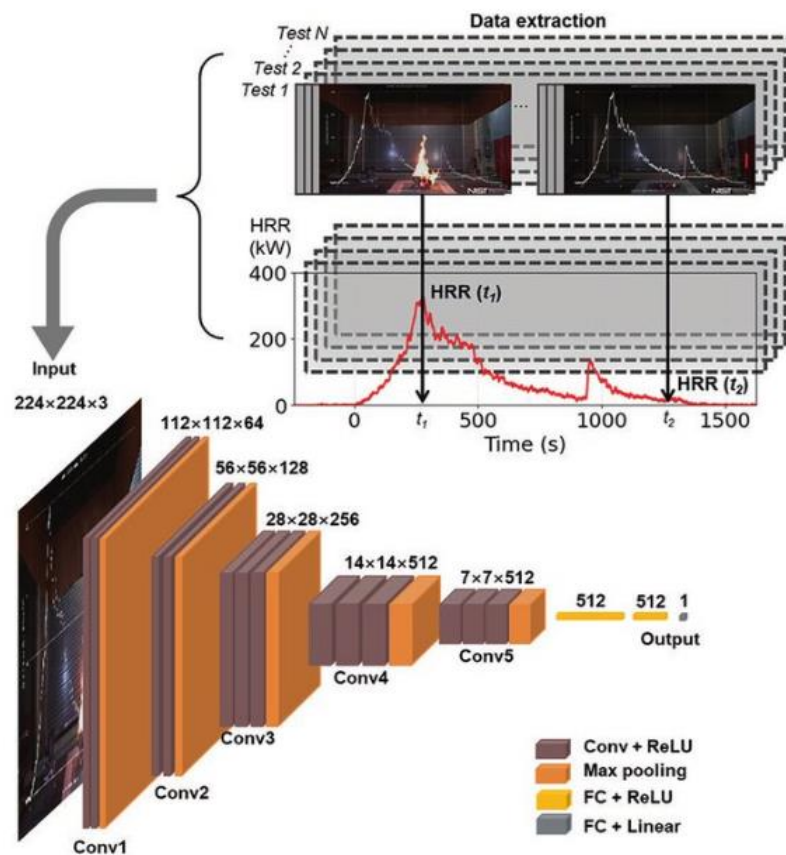


Рис. 12. Архітектура системи моделювання пожеж у висотних будівлях із використанням глибокого навчання

Оцінка політики управління пожежною безпекою в умовах розумних міст є важливим елементом забезпечення сталого розвитку. Як зазначають у [15], інтеграція великих даних (ВД) та штучного інтелекту (ШІ) дозволяє не лише зменшити кількість пожеж, але й підвищити ефективність гасіння, зменшити матеріальні збитки та кількість жертв. У дослідженні, проведеному в місті Наньчан, нова політика управління пожежною безпекою на основі великих даних показала збільшення ефективності гасіння пожеж на 9,07%. Основні етапи пожежно-рятувального процесу в контексті використання великих даних представлені на рис. 13.

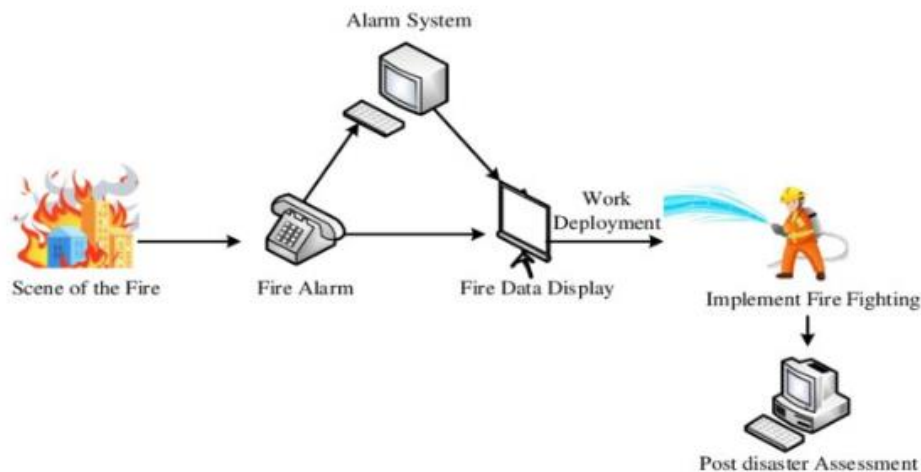


Рис. 13. Пожежно-рятувальний процес у використанні великих даних (BD)

Також, дослідження вказують, що штучний інтелект (ШІ) демонструє значний потенціал у сфері пожежної безпеки завдяки інтеграції передових технологій, таких як глибинне навчання, цифрові двійники, IoT та прогнозування на основі великих даних. Проведені дослідження підтверджують ефективність ШІ у вдосконаленні проєктування пожежної безпеки, моніторингу в реальному часі та прогнозуванні надзвичайних ситуацій.

За результатами аналізу наукових джерел виявлено, що ШІ має значний потенціал для поліпшення кожного етапу роботи з пожежами: від прогнозування та раннього виявлення до управління ресурсами та відновлення територій після надзвичайних ситуацій. Інтеграція ШІ дозволяє оперативно обробляти великі обсяги даних, забезпечуючи точність та ефективність аналізу, що є критично важливим для своєчасного реагування на надзвичайні ситуації.

Використання ШІ дозволить скоротити час реакції, підвищити точність аналізу ризиків та оптимізувати управління евакуацією. Завдяки інтеграції цих технологій можливе створення більш безпечних і стійких систем, які сприяють мінімізації збитків та підвищенню надійності реагування на пожежі.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження – дослідити ефективність інтеграції штучного інтелекту в програмні комплекси для покращення процесів прогнозування, виявлення, моніторингу та управління пожежами, зокрема для забезпечення необхідного рівня пожежної безпеки та реагування на надзвичайні ситуації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

1. Проаналізувати наукові джерела щодо підходів забезпечення пожежної безпеки шляхом впровадження технологій на основі штучного інтелекту (ШІ) для вдосконалення проєктування пожежної безпеки, моніторингу в реальному часі та прогнозуванні надзвичайних ситуацій.

2. Оцінити можливості програмних комплексів на основі ШІ для оптимізації ресурсів під час гасіння пожеж, планування заходів контролю та зменшення ризиків для населення і майна, а також їх вплив на відновлення територій після надзвичайних ситуацій та відповідно оцінити потенціал інтеграції подібних систем у вітчизняну практику для підвищення рівня пожежної безпеки.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

IFETool – це передове програмне забезпечення, розроблене для аналізу та оптимізації пожежної безпеки в будівлях. Цей інструмент базується на штучному інтелекті з точністю прогнозу моделі 97%, що робить час обчислення набагато коротшим, ніж у традиційних методах.

IFETool створили вчені Яньфу Цзена, Сяоніна Чжана, Лінг-чу Су, Сіцян Ву та Хуан Сіняна. Він спрямований на вирішення деяких основних обмежень існуючих методологій аналізу пожежної безпеки. Основна мета розробки цього інструменту – забезпечити швидке, економічне та точне моделювання сценаріїв пожежі. Це дозволить інженерам і архітекторам приймати обґрунтовані рішення щодо пожежної стратегії, використовуючи базу даних моделювання CFD, особливо щодо складних геометрій будівель.

Програмний комплекс IFETool об'єднує кілька основних функцій, спрямованих на забезпечення безпеки в умовах пожежі. Інструмент дає змогу прогнозувати поширення диму разом із температурою та концентрацією CO, враховуючи геометрію будівлі та можливі сценарії розвитку подій. Він також використовується для розрахунку доступного безпечного часу виходу у порівнянні з необхідним безпечним часом виходу для прийняття рішення про потреби зміни конструкції або зміни стратегії пожежі (рис. 14).

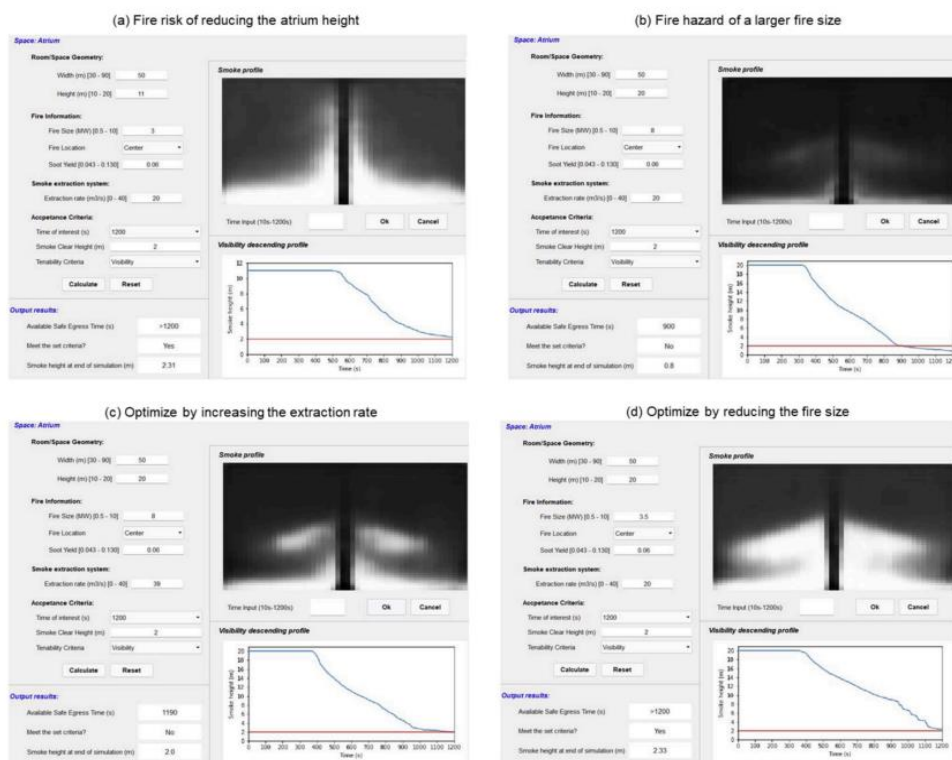


Рис. 14. Оцінка пожежної безпеки атриуму за допомогою IFETool, (а) зменшення висоти атриуму, (б) збільшення розміру пожежі, (с) оптимізація конструкції шляхом збільшення швидкості димовидалення та (д) зменшення розміру пожежі

Інструмент може враховувати зменшення висоти атриуму, збільшення розміру пожежі, а також оптимізацію системи димовидалення або зміну розміру пожежного навантаження.

IFETool активно застосовується для вирішення складних завдань. Наприклад, при розгляді варіантів зміни висоти атриуму для збільшення корисної площі будівлі,

інструмент надає рекомендації щодо необхідної швидкості димовидалення. У випадку змін у пожежному навантаженні система дозволяє швидко оцінити відповідність існуючих систем безпеки новим умовам.

IFETool демонструє високу ефективність у вирішенні задач, пов'язаних із забезпеченням пожежної безпеки. Завдяки використанню сучасних алгоритмів штучного інтелекту, цей інструмент значно спрощує процес прийняття рішень, забезпечуючи високу точність і швидкість розрахунків. Майбутні оновлення програмного комплексу спрямовані на розширення можливостей для аналізу нових типів будівель і сценаріїв.

FireAI – це програмний комплекс, розроблений компанією Robotto, який використовує штучний інтелект для автоматизації обробки даних та створення карт, що значно спрощує процеси, пов'язані з гасінням лісових пожеж. Система інтегрується з платформою Nova Maps, забезпечуючи користувачам зручний інтерфейс для створення детальних та інформативних карт без необхідності залучення фахівців з геоінформаційних систем (ГІС) [16].

Однією з ключових функцій FireAI є модуль Hotspots (Гарячі точки), який використовує передові алгоритми штучного інтелекту для автоматичного та точного виявлення гарячих точок на інфрачервоних зображеннях. Ця інформація допомагає планувати стратегію боротьби з вогнем, відстежувати його поширення та визначати зони підвищеного ризику. На рис. 16 зображено карту проекту FireAI, до якої були додані знімки з дрону, оброблені програмним забезпеченням із застосуванням штучного інтелекту. ШІ автоматично виявив гарячі точки осередків пожежі, які позначені на карті червоними точками, що дозволяє оперативно аналізувати ситуацію та реагувати на загрози.

Доповнюючи модуль Hotspots, функція Fire Perimeter (Периметр пожежі) надає інструменти для створення аналітичних даних щодо розширення пожежі. Використовуючи передові полігональні інструменти, система дозволяє визначати межі пожежі та аналізувати її динаміку, що є критично важливим для ефективного реагування та прийняття рішень.

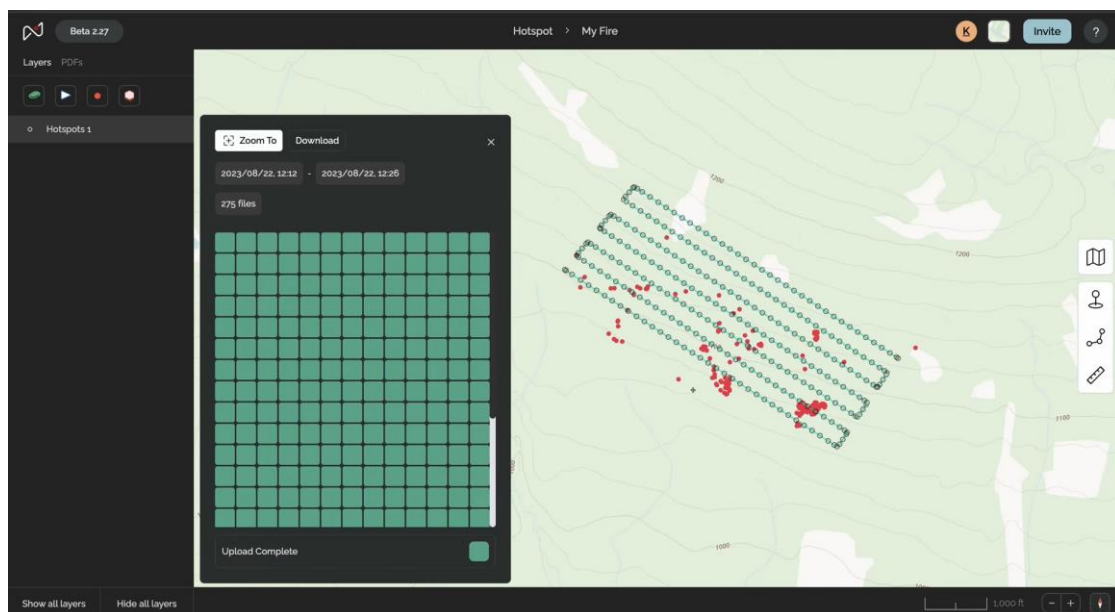


Рис. 16. Карта з гарячими точками осередків пожежі, виявленими за допомогою ШІ проекту FireAI

Для покращення візуалізації та передачі критичної інформації FireAI пропонує Wildfire Icon Pack (Набір ікон для лісових пожеж) – бібліотеку спеціалізованих ікон, які

можна додавати на карту. Це забезпечує чітке та інформативне позначення важливих об'єктів та явищ, сприяючи кращій комунікації між учасниками операцій з гасіння пожеж.

Nova Maps – це інтуїтивно зрозуміле програмне забезпечення для створення карт, яке спрощує процес обробки даних, отриманих з дронів. Воно дозволяє легко створювати ортомозаїки, накладати відео та обробляти теплові зображення, забезпечуючи користувачів точними та детальними картами для прийняття обґрунтованих рішень.

FireAI сумісний з різноманітними платформами та пристроями, що робить його універсальним інструментом для пожежних служб у всьому світі. Завдяки простоті використання та автоматизації складних процесів, FireAI дозволяє зосередитися на головному – ефективному та безпечному гасінні пожеж, мінімізуючи ризики для життя людей та збереження навколишнього середовища.

FireAI є цікавим інструментом, який використовує штучний інтелект для автоматизації процесів виявлення та моніторингу лісових пожеж. Його функціональні можливості, такі як автоматичне виявлення гарячих точок, визначення периметру пожежі та використання спеціалізованих ікон для картографування, значно підвищують ефективність та безпеку операцій з гасіння пожеж. Інтеграція з платформою Nova Maps забезпечує зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для користувачів, що робить FireAI зручним інструментом для пожежних служб у всьому світі.

Проект **OVERWATCH** розробляє новий набір алгоритмів машинного навчання для картографування повеней, пожеж та пошкоджених територій. Ці алгоритми призначені для використання як даних супутників Copernicus Sentinel, так і даних, отриманих за допомогою дронів. Різноманітність та експертиза команди проекту сприяють розробці та навчанню цих моделей [17].

Зокрема, для супутника Sentinel-2 планується застосування технік суперроздільної здатності, які будуть навчені на 10-метрових (видимий та ближній інфрачервоний діапазони) та 20-метрових (red edge, SWIR діапазони) даних, щоб покращити просторову роздільну здатність вихідних даних до 5 метрів. Це дозволить оцінити ефективність такого підходу для створення більш точних карт. Навчені алгоритми будуть оцінені та валідовані на реальних випадках, зокрема повенях та пожежах, що відбуватимуться протягом тривалості проекту, а їхні операційні можливості будуть перевірені за допомогою дронів.

Переваги використання ШІ в проекті **OVERWATCH**:

- здатність обробляти великі обсяги даних у короткий час;
- може працювати 24/7;
- навчені моделі значно зменшують кількість помилок та підвищують точність і прецизійність.

Прикладом застосування цих технологій є напівавтоматичне виділення згорілих територій в Іспанії, що демонструє ефективність розроблених алгоритмів у реальних умовах.

Штучний інтелект, розроблений у рамках проекту **OVERWATCH**, пропонує інструменти для швидкого та точного картографування стихійних лих, таких як повені та пожежі. Використання передових алгоритмів машинного навчання та інтеграція даних з різних джерел, включаючи супутники та дрони, забезпечує ефективне управління кризовими ситуаціями та мінімізацію їхніх наслідків для суспільства та навколишнього середовища.

ALERTCalifornia – це програма, заснована в Університеті Каліфорнії в Сан-Дієго, яка використовує передові технології для моніторингу та реагування на природні лиха, зокрема лісові пожежі. Одним із ключових компонентів цієї програми є мережа з понад 1 080 високоточних панорамних камер, розташованих по всій Каліфорнії, що

забезпечують цілодобовий моніторинг із використанням інфрачервоної нічної візії. Ці камери здатні виконувати 360-градусні оберти приблизно кожні дві хвилини та охоплювати до 60 миль удень і 120 миль уночі за ясної погоди [18].

У співпраці з Департаментом лісового господарства та протипожежного захисту Каліфорнії (CAL FIRE) та партнером Digital Path, ALERTCalifornia розробила інструмент на основі штучного інтелекту для виявлення пожеж. Цей ШІ аналізує дані з мережі камер, виявляючи аномалії, що можуть свідчити про початок пожежі. При виявленні потенційного займання система надсилає сповіщення пожежникам із зазначенням рівня впевненості та приблизного місця інциденту. Після підтвердження, рятувальники можуть швидко реагувати на пожежу на ранній стадії, що дозволяє стримувати її поширення. На рис. 17 зображено карту мережі камер ALERTCalifornia, яка покриває територію штатів Каліфорнія та сусідніх регіонів. У правій частині показано реальні зображення з камер у режимі реального часу, що використовуються для моніторингу та виявлення пожеж.

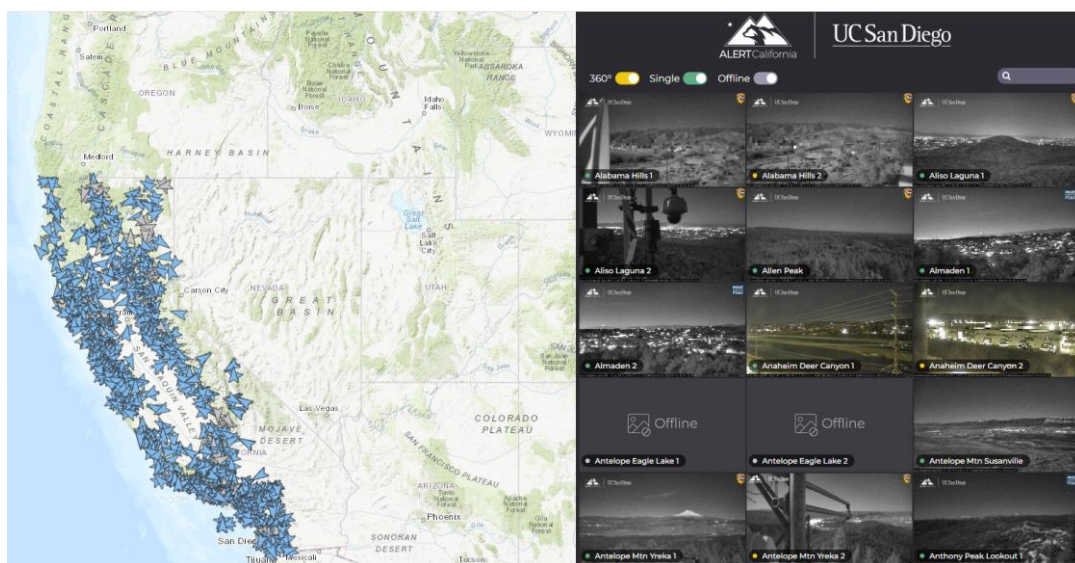


Рис. 17. Мережа камер ALERTCalifornia

Ця технологія особливо ефективна у віддалених районах і в нічний час, коли традиційні методи виявлення можуть бути менш надійними. У вересні 2023 року ШІ виявив займання поблизу Грасс-Веллі о 5:19 ранку, тоді як перший дзвінок на номер 911 надійшов лише о 6:01 ранку. Завдяки ранньому виявленню та швидкому реагуванню пожежу вдалося обмежити площею менше чверті акра.

Впровадження ШІ в рамках проєкту ALERTCalifornia значно підвищує ефективність боротьби з лісовими пожежами, зменшуючи час реагування та покращуючи ситуаційну обізнаність. Ця технологія отримала визнання, зокрема була названа одним із найкращих винаходів 2023 року за версією журналу TIME.

Штучний інтелект, інтегрований у проєкт ALERTCalifornia, демонструє значний потенціал у ранньому виявленні та реагуванні на лісові пожежі. Поєднання мережі високоточних камер із передовими алгоритмами машинного навчання забезпечує швидке виявлення аномалій, що сприяє ефективному стримуванню пожеж на ранніх стадіях та мінімізації їхнього впливу на довкілля та суспільство.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Функціональні можливості штучного інтелекту у системі Wildfire Analyst, розробленій компанією Technosylva, демонструють інноваційний підхід до

прогнозування поширення лісових пожеж, аналізу ризиків та підтримки оперативного реагування. Ця система поєднує сучасні алгоритми з мобільними та хмарними технологіями, забезпечуючи всебічний аналіз у реальному часі [19].

Wildfire Analyst є інструментом, який дозволяє прогнозувати поширення пожеж, аналізувати ризики та розробляти сценарії "що, якщо". Система інтегрується з прогнозами погоди, забезпечуючи актуальні дані щодо ризиків пожеж та потенційних наслідків. Як зазначають автори дослідження Монедеро С., Рамірес Х. та Карділ А., мобільний додаток "Кишеньковий аналітик лісових пожеж" дозволяє прогнозувати поведінку вогню безпосередньо з місця події, надаючи пожежникам ключову інформацію для оперативного прийняття рішень [20].

FireRisk – компонент, який забезпечує щоденні прогнози ризику лісових пожеж, враховуючи погодні умови та вологість палива. Ці дані оновлюються кожні 1–3 години, що дозволяє своєчасно виявляти зони підвищеної небезпеки.

FireSim надає можливості прогнозування поширення активних пожеж у режимі реального часу, а також аналізу сценаріїв "що, якщо". Це сприяє не лише оперативному реагуванню, але й стратегічному плануванню для зменшення впливу пожеж.

FireSight дозволяє оцінити ризики для інфраструктури та потенційні способи їх зменшення шляхом зміцнення об'єктів. Цей підхід забезпечує довгострокове планування для підвищення стійкості до лісових пожеж.

На рис. 18 зображено приклад використання даних із Wildfire Analyst для прогнозування поширення пожежі та поведінки на лінії пожежі. Карта демонструє зони поширення вогню, точки займання, межі пожежі та оцінки ризиків. Ці дані є ключовими для прийняття рішень у польових умовах.

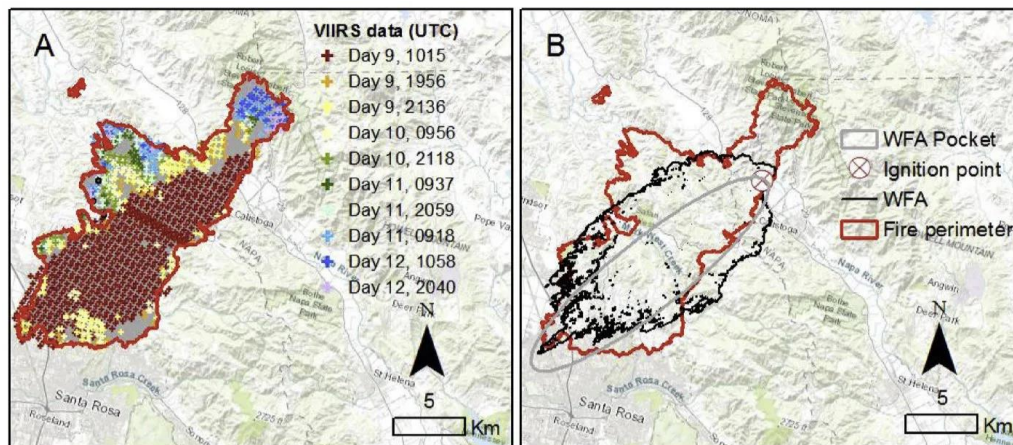


Рис. 18. Прогнозування поширення пожежі та поведінки на лінії пожежі

Інтеграція з реальними даними про погоду, вологість палива та інші фактори робить Wildfire Analyst потужним інструментом для організацій, що займаються управлінням ризиками лісових пожеж. Завдяки використанню штучного інтелекту, система щодня виконує мільйони симуляцій, що сприяє підвищенню точності прогнозів.

Wildfire Analyst стає невід'ємною частиною сучасного управління ризиками пожеж, забезпечуючи ефективне реагування та підтримку прийняття рішень для пожежників, інфраструктурних компаній та інших зацікавлених сторін.

Рано AI – це система, що використовує штучний інтелект для автоматичного виявлення, підтвердження та класифікації лісових пожеж у режимі реального часу. Система складається з мережі Rano Stations, розташованих на високих точках, які

безперервно сканують ландшафт за допомогою 360-градусних ультрависокоякісних камер. Ці станції здатні виявляти ознаки пожежної активності в радіусі до 10 миль [21].

Алгоритми глибокого навчання та комп'ютерного зору, інтегровані в Rapo AI, автоматично аналізують отримані зображення для виявлення потенційних загроз (рис. 19). У разі виявлення можливого займання система надсилає сповіщення професіоналам з моніторингу пожеж, надаючи інтелектуально центровані зображення з покращеним зумом, що прискорює підтвердження події та визначення точного місця пожежі.



Рис. 19. Виявлення штучного інтелекту Rapo

Після підтвердження пожежі Rapo AI допомагає швидко поширювати інформацію серед розширеної команди в режимі реального часу. Вбудовані інструменти для сповіщень та мобільних повідомлень забезпечують першим реагувальникам доступ до актуальних зображень та ключової інформації про місцезнаходження та рух пожежі, що дозволяє реагувати на події з більшою точністю та контролем.

Використання Rapo AI сприяє швидшому виявленню та реагуванню на лісові пожежі, що допомагає зменшити їхній вплив на життя людей, майно та довкілля. Інтеграція сучасних технологій ШІ з високоточними камерами та платформою для управління інформацією підвищує ефективність боротьби з лісовими пожежами.

Система Rapo AI демонструє ефективність використання штучного інтелекту для раннього виявлення та моніторингу лісових пожеж. Поєднання мережі високоточних камер, алгоритмів глибокого навчання та інтегрованої платформи для підтвердження та поширення інформації сприяє швидкому реагуванню на пожежі та мінімізації їхніх наслідків.

OroraTech – це платформа, яка використовує супутникові дані для вирішення проблеми моніторингу та управління лісовими пожежами. Основою системи є інтеграція даних із понад 20 супутникових джерел, включаючи дані NASA, NOAA, ESA та приватних компаній. Ця інформація аналізується алгоритмами ШІ для забезпечення точного та своєчасного виявлення пожеж [22].

Система включає кілька основних компонентів.

Перший компонент, оцінка ризику, передбачає прогнозування можливості виникнення пожеж на основі погодних умов, вологості рослинності та інших екологічних факторів. Цей підхід дозволяє визначити потенційно небезпечні території та вжити превентивних заходів.

Другий компонент, раннє виявлення, реалізується завдяки аналізу супутникових зображень у режимі реального часу. Алгоритми машинного навчання автоматично

виявляють аномалії, пов'язані з можливим займанням. У разі виявлення потенційної загрози система генерує сповіщення для відповідних служб, забезпечуючи швидке реагування.

Третій компонент, моніторинг у реальному часі, дозволяє стежити за розвитком пожежі на основі постійних оновлень. Система забезпечує кілька оновлень на годину, що дозволяє координувати дії рятувальних служб у динамічному середовищі.

Останнім компонентом є аналіз збитків, який допомагає оцінити площу згорілих територій та масштаби пошкоджень. Ці дані використовуються для планування заходів з відновлення лісових екосистем та інфраструктури.

Інтеграція цих компонентів забезпечує ефективну систему управління лісовими пожежами, яка використовується у багатьох регіонах світу. Застосування штучного інтелекту дозволяє значно скоротити час реагування на лісові пожежі, зменшуючи їхній вплив на навколишнє середовище та суспільство.

Система OgoTech застосовує космічні технології у поєднанні з алгоритмами штучного інтелекту для боротьби з лісовими пожежами. Інтеграція супутникових даних та передових методів аналізу дозволяє ефективно прогнозувати, виявляти та моніторити пожежі, а також оцінювати їхні наслідки. Такий підхід сприяє не лише покращенню управління кризовими ситуаціями, але й захисту екосистем та життя людей.

6 ВИСНОВКИ

1. Статистика пожеж та надзвичайних ситуацій свідчить про зростання кількості та масштабності пожеж та надзвичайних ситуацій у світі та в Україні. Основними причинами залишаються порушення техніки безпеки, техногенні фактори та вплив людського фактору. Особливу увагу привертають катастрофи, спричинені ракетними обстрілами, техногенними аваріями та природними пожежами, які мають значні людські та матеріальні втрати. За результатами аналізу наукових джерел виявлено, що ШІ має значний потенціал для поліпшення кожного етапу роботи з пожежами: від прогнозування та раннього виявлення до управління ресурсами та відновлення територій після надзвичайних ситуацій. Інтеграція ШІ дозволяє оперативно обробляти великі обсяги даних, забезпечуючи точність та ефективність аналізу, що є критично важливим для своєчасного реагування на надзвичайні ситуації.

2. Вітчизняні та зарубіжні дослідження підтверджують ефективність застосування технологій штучного інтелекту для моніторингу, аналізу та прогнозування надзвичайних ситуацій. Зокрема, такі технології, як цифрові двійники, алгоритми машинного навчання дозволяють оперативно реагувати на пожежі, покращувати управління рятувальними операціями та мінімізувати ризики для населення та майна.

3. Програмні комплекси штучного інтелекту надають можливості для прогнозування ризиків пожеж, швидкого виявлення займання, оптимізації ресурсів під час гасіння та планування заходів контролю. Також вони забезпечують аналіз наслідків пожеж та сприяють розробці стратегій для запобігання майбутнім загрозам. Їхнє використання охоплює всі етапи роботи з пожежами, від протипожежних заходів до відновлення територій. Інтеграції подібних систем у вітчизняну практику для підвищення рівня пожежної безпеки. Оцінено потенціал інтеграції подібних систем у вітчизняну практику з метою підвищення рівня пожежної безпеки.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори статті не мають відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

Література

1. Кабінет Міністрів України. “Оперативна інформація щодо ліквідації надзвичайної ситуації, пов’язаної з лісовими пожежами на території Луганської області станом на 7:00 6 жовтня”. Урядовий портал. 2024. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/operativna-informaciya-shchodo-likvidaciyi-nadzvichajnoyi-situaciyi-povyazanoyi-z-lisovimi-pozhezhami-na-teritoriyi-luganskoyi-oblasti-stanom-na-700-6-zhovtnya>.
2. Головне управління ДСНС України у Луганській області. “Рятувальники ліквідували наслідки надзвичайної ситуації в Луганській області”. Facebook. 2024. URL: <https://www.facebook.com/lugdSNS/posts/pfbid0RriAPizz7syWT3GWCMIY83jkVZuKgCzudADKZWh5h2HivjK1xzMUq86g9jUPk8Nyl>.
3. California Department of Forestry and Fire Protection (CAL FIRE). “2020 Incidents” // CAL FIRE. 2020. URL: <https://www.fire.ca.gov/incidents/2020/>.
4. Dixie Fire. Вікіпедія. 2024. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Dixie_Fire.
5. Підрив Каховської ГЕС. Вікіпедія. 2024. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%B8%D0%B2_%D0%9A%D0%B0%D1%85%D0%BE%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D1%97_%D0%93%D0%95%D0%A1 (дата звернення: 26.11.2024).
6. Лісові пожежі в Австралії. Вікіпедія. 2024. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D1%96%D1%81%D0%BE%D0%B2%D1%96_%D0%BF%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%B6%D1%96_%D0%B2_%D0%90%D0%B2%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BB%D1%96%D1%97 (дата звернення: 26.11.2024).
7. Huang, X., Wu, X., Usmani, A. (2022). Perspectives of Using Artificial Intelligence in Building Fire Safety. In: Naser, M., Corbett, G. (eds) Handbook of Cognitive and Autonomous Systems for Fire Resilient Infrastructures. Chapter 6, Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-030-98685-8_6
8. Parekh R. “Applications of Artificial Intelligence in Enhancing Building Fire Safety” // International Journal of Science and Research Archive. 2024. 13(1) p. 1117–1132. DOI: 10.30574/ijrsra.2024.13.1.1781. URL: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.13.1.1781>.
9. Wu X., Huang X., Usmani A. Artificial Intelligence Tool for Fire Safety Design (IFETool): Demonstration in Large Open Spaces, 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/364306800_Artificial_Intelligence_tool_for_fire_safety_design_IFETool_Demonstration_in_large_open_spaces.
10. L. Su, X. Wu, X. Zhang, X. Huang (2021) Smart Performance-Based Design for Building Fire Safety: Prediction of Smoke Motion via AI, Journal of Building Engineering, 102529. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102529>.
11. T. Zhang, Z. Wang, Y. Zeng, X. Wu, X. Huang, F. Xiao (2022) Building Artificial-Intelligence Digital Fire (AID-Fire) System: A Real-scale Demonstration, Journal of Building Engineering, 105363. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105363>.
12. Chang RH, Peng YT, Choi S, Cai C. 2022. Applying Artificial Intelligence (AI) to improve fire response activities. Emergency Management Science and Technology 2:7 <https://doi.org/10.48130/EMST-2022-0007>.
13. X. Wu, X. Zhang, Y. Jiang, X. Huang, G. Huang, A. Usmani (2021) Intelligent tunnel fire safety monitoring system: Framework and small-scale demonstration, Tunnelling and Underground Space Technology, 104301. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104301>.
14. Sharma A., Zhang T., Dwivedi G. “Façade Fires in High-Rise Buildings: Challenges and Artificial Intelligence Solutions” // Sustainable Structures and Buildings. 2024. 6. p. 77–92. DOI: 10.1007/978-3-031-46688-5_6. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-46688-5_6
15. Qian X. “Evaluation on Sustainable Development of Fire Safety Management Policies in Smart Cities Based on Big Data”// Mathematical Biosciences and Engineering. 2023. 20 (9). p. 17003–17017. DOI: 10.3934/mbe.2023758. URL: <https://doi.org/10.3934/mbe.2023758>.
16. FireAI. Офіційний вебсайт. URL: <https://www.fireai.io/>.
17. Overwatch Project. "Artificial Intelligence in Overwatch Technology" // Офіційний вебсайт Overwatch Project. 2024. URL: <https://overwatchproject.eu/en/technology/artificial-intelligence/> (дата звернення: 05.01.2025).
18. AlertCalifornia. Офіційний вебсайт. URL: <https://alertcalifornia.org/>.

19. Technosylva. "Wildfire Analyst" // Офіційний вебсайт Technosylva. 2024. URL: <https://technosylva.com/products/wildfire-analyst/>.
20. Монеделеро С., Рамірес Х., Карділ А. "Прогнозування поширення пожежі та поведінки на лінії пожежі. Кишеньковий аналітик лісових пожеж: мобільний додаток для прогнозування лісових пожеж" // ScienceDirect. 2018. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.04.002. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304380018304046?via%3Dihub>.
21. Пано АІ. Офіційний вебсайт. URL: <https://www.pano.ai/>.
22. OroraTech. Офіційний вебсайт. URL: <https://ororatech.com/>.

References

1. Kabinet Ministriv Ukrainy. "Operativna informatsiia shchodo likvidatsii nadzvychainoi situatsii, poviazanoi z lisovymu pozhezhamy na terytorii Luhanskoï oblasti stanom na 7:00 6 zhovtnia". Uriadovyi portal. 2024. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/operativna-informaciya-shchodo-likvidatsiyi-nadzvichajnoyi-situatsiyi-povyzanoyi-z-lisovimi-pozhezhami-na-teritoriyi-luganskoyi-oblasti-standom-na-700-6-zhovtnya>.
2. Holovne upravlinnia DSNS Ukrainy u Luhanskii oblasti. "Riatuvalnyky likviduvaly naslidky nadzvychainoi situatsii v Luhanskii oblasti". Facebook. 2024. URL: <https://www.facebook.com/lugdsns/posts/pfbid0RriAPizz7syWT3GWCMiY83jkVZukgCzudADKZWh5h2HivjK1xzMUq86g9jUPk8Nyl>.
3. California Department of Forestry and Fire Protection (CAL FIRE). "2020 Incidents" // CAL FIRE. 2020. URL: <https://www.fire.ca.gov/incidents/2020/>.
4. Dixie Fire. Vikipediia. 2024. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Dixie_Fire.
5. Pidryv Kakhovskoi HES. Vikipediia. 2024. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%B8%D0%B2_%D0%9A%D0%B0%D1%85%D0%BE%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D1%97_%D0%93%D0%95%D0%A1.
6. Lisovi pozhezhi v Avstralii. Vikipediia. 2024. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D1%96%D1%81%D0%BE%D0%B2%D1%96_%D0%BF%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%B6%D1%96_%D0%B2_%D0%90%D0%B2%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BB%D1%96%D1%97 (дата звернення: 26.11.2024).
7. Huang, X., Wu, X., Usmani, A. (2022). Perspectives of Using Artificial Intelligence in Building Fire Safety. In: Naser, M., Corbett, G. (eds) Handbook of Cognitive and Autonomous Systems for Fire Resilient Infrastructures. Chapter 6, Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-030-98685-8_6
8. Parekh R. "Applications of Artificial Intelligence in Enhancing Building Fire Safety" // International Journal of Science and Research Archive. 2024. 13(1) p. 1117–1132. DOI: 10.30574/ijrsra.2024.13.1.1781. URL: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.13.1.1781>.
9. Wu X., Huang X., Usmani A. Artificial Intelligence Tool for Fire Safety Design (IFETool): Demonstration in Large Open Spaces, 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/364306800_Artificial_Intelligence_tool_for_fire_safety_design_IFETool_Demonstration_in_large_open_spaces.
10. L. Su, X. Wu, X. Zhang, X. Huang (2021) Smart Performance-Based Design for Building Fire Safety: Prediction of Smoke Motion via AI, Journal of Building Engineering, 102529. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102529>.
11. T. Zhang, Z. Wang, Y. Zeng, X. Wu, X. Huang, F. Xiao (2022) Building Artificial-Intelligence Digital Fire (AID-Fire) System: A Real-scale Demonstration, Journal of Building Engineering, 105363. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105363>
12. Chang RH, Peng YT, Choi S, Cai C. 2022. Applying Artificial Intelligence (AI) to improve fire response activities. Emergency Management Science and Technology 2:7 <https://doi.org/10.48130/EMST-2022-0007>.
13. X. Wu, X. Zhang, Y. Jiang, X. Huang, G. Huang, A. Usmani (2021) Intelligent tunnel fire safety monitoring system: Framework and small-scale demonstration, Tunnelling and Underground Space Technology, 104301. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104301>.
14. Sharma A., Zhang T., Dwivedi G. "Façade Fires in High-Rise Buildings: Challenges and Artificial Intelligence Solutions" // Sustainable Structures and Buildings. 2024. 6. p. 77–92. DOI: 10.1007/978-3-031-46688-5_6. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-46688-5_6.

15. Qian X. "Evaluation on Sustainable Development of Fire Safety Management Policies in Smart Cities Based on Big Data" // *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2023. 20 (9). p. 17003–17017. DOI: 10.3934/mbe.2023758. URL: <https://doi.org/10.3934/mbe.2023758>.
16. FireAI. Офіційний вебсайт. URL: <https://www.fireai.io/>.
17. Overwatch Project. "Artificial Intelligence in Overwatch Technology" // Офіційний вебсайт Overwatch Project. 2024. URL: <https://overwatchproject.eu/en/technology/artificial-intelligence/> (дата звернення: 05.01.2025).
18. AlertCalifornia. Офіційний вебсайт. URL: <https://alertcalifornia.org/>.
19. Technosylva. "Wildfire Analyst" // Офіційний вебсайт Technosylva. 2024. URL: <https://technosylva.com/products/wildfire-analyst/>.
20. Monedero S., Ramires Kh., Kardil A. "Prohnozuvannia poshyrennia pozhezhi ta povedinky na linii pozhezhi. Kyshenkovyi analityk lisovykh pozhezh: mobilnyi dodatok dlia prohnozuvannia lisovykh pozhezh". *ScienceDirect*. 2018. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.04.002. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304380018304046?via%3Dihub>.
21. Pano AI. Офіційний вебсайт. URL: <https://www.pano.ai/>.
22. OroraTech. Офіційний вебсайт. URL: <https://ororatech.com/>.

Даник Юлія Олександрівна

Національний університет цивільного захисту України,
заступник начальника відділу організаційно-аналітичного та документального забезпечення,
вул. Онопрієнка, 8, Черкаси, Україна, 18000
yu.danyk@dsns.gov.ua

ORCID: 0009-0004-2203-0945

Кіріченко Дар'я Олексіївна

Одеська державна академія будівництва та архітектури,
доктор філософії, старший викладач,
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029
dkirichenko@odaba.edu.ua

ORCID: 0000-0002-8484-0925

Для посилань:

Даник Ю. О., Кіріченко Д. О. Застосування систем штучного інтелекту для вирішення проблем пожежної безпеки. *Механіка та математичні методи*, 2025. Т. VII. № 1. с. 152–172

For references:

Yu. Danyk, D. Kirichenko. (2025). Application of artificial intelligence systems to solving fire safety problems. *Mechanics and mathematical methods*. VII (1). 152–172.

Наукове видання

МЕХАНІКА ТА МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ
MECHANICS AND MATHEMATICAL METHODS

Науковий журнал
(українською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск: Ковров А. В.

Підписано до друку 20.03.2025 р.
Формат 60×84/8 Папір офісний Гарнітура Times
Цифровий друк. Ум.-друк. арк. 19,99
Наклад 50 прим. Зам. №24-23Е

Видавець і виготовлювач:
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Свідоцтво ДК № 4515 від 01.04.2013 р.
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.
тел.: (048) 729-85-34, e-mail: rio@odaba.edu.ua

Надруковано в авторській редакції з готового оригінал-макету
в редакційно-видавничому відділі ОДАБА