

ISSN 2786-6696 (print)
ISSN 2786-670X (online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ**

СУЧАСНЕ БУДІВНИЦТВО ТА АРХІТЕКТУРА

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

**Випуск № 13
вересень 2025**

ОДЕСА 2025

СУЧАСНЕ БУДІВНИЦТВО ТА АРХІТЕКТУРА
ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ISSN 2786-6696 (print) ISSN 2786-670X (online)

Випуск № 13, вересень 2025

Збірник наукових праць видається під назвою “Сучасне будівництво та архітектура” з 2022 р., періодичність – 4 рази на рік.

Попередня назва збірнику – Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, з 2000 р.

Засновник і видавець – Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса.

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №25221-15161ПР від 10 червня 2022 р.

Збірник наукових праць входить до переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт. Наказ МОН України №1643 від 28.12.2019 року (категорія Б).

З 2016 р. збірник наукових праць індексується в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus.

У збірнику представлені результати наукових і експериментально-теоретичних досліджень у галузі будівництва та архітектури; будівельних конструкцій; будівельних матеріалів та технологій; гідротехнічного та транспортного будівництва; інженерних мереж та обладнання; основ та фундаментів; технології та організації будівельного виробництва.

Призначений для наукових працівників, спеціалістів проектних установ та виробничих підприємств будівельної галузі, аспірантів та магістрів навчальних закладів.

Головний редактор – Вировой В.М. – д-р техн. наук, проф., ОДАБА;

Відповідальний редактор – Кровяков С.О. – д-р техн. наук, доц., ОДАБА;

Відповідальний секретар – Антонюк Н.Р. – к-т техн. наук, доц., ОДАБА.

Редакційна колегія:

Азізов Т.Н. – д-р техн. наук, проф., Уманський державний педагогічний університет ім. П. Тичини (за згодою);

Горик О.В. – д-р техн. наук, проф., Полтавська державна аграрна академія (за згодою);

Клименко Є.В. – д-р техн. наук, проф., ОДАБА;

Кривенко П.В. – д-р техн. наук, проф., Науково-дослідний інститут в’язучих матеріалів ім. В.Д. Глуховського (за згодою);

Крутії Ю.С. – д-р техн. наук, проф., ОДАБА;

Ляшенко Т.В. – д-р техн. наук, проф., ОДАБА;

Менейлюк О.І. – д-р техн. наук, проф., ОДАБА;

Плугін А.А. – д-р техн. наук, проф., Український державний університет залізничного транспорту (за згодою);

Саницький М.А. – д-р техн. наук, проф., НУ «Львівська політехніка» (за згодою);

Сур’янінов М.Г. – д-р техн. наук, проф., ОДАБА;

Шинкевич О.С. – д-р техн. наук, проф., ОДАБА;

Czarnecki Lech – Professor, Instytut Techniki Budowlanej, ITB, Warsaw, Польща (за згодою);

Iskhakov Iakov – Ph.D., Professor, Ariel University, Ariel, Ізраїль (за згодою);

Fischer Hans-Bertram – Dr.-Ing., Bauhaus-Universität, Weimar, Німеччина (за згодою);

Kozina Goran – Professor, University North, Хорватія (за згодою);

Milkovic Marin – Ph.D., University North, Хорватія (за згодою);

Ramanathan Hareesh N – Dr., Professor, TCS Institute of Science and Technology, Arakkunnam, Kochi, Kerala, India;

Ribakov Y.I. – Ph.D., Professor, Ariel University, Ariel, Ізраїль (за згодою);

Slapac Mariana – Dr. Habilitat of Art, Cultural Heritage Institut, Chisinau, Молдова (за згодою).

Технічна редакція:

Зайцева О.Ю. – к.філ.н., доц., ОДАБА, завідувача кафедрою «Іноземних мов»;

Рекомендовано до видання Вченою радою ОДАБА

Протокол № 2 від 18.09.2025 р.

Свідоцтво КВ №25221-15161ПР від 10.06. 2022 р.

Наказ МОН України №1643 від 28.12.2019 р. (категорія Б)

ISSN 2786-6696 (print)

ISSN 2786-670X (online)



[This work](#) © 2025 by Одеською державною академією будівництва та архітектури is licensed under [CC BY 4.0](#)

ISSN 2786-6696 (print)
ISSN 2786-670X (online)

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESA STATE ACADEMY
OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

***MODERN CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE***

COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS

**Issue № 13
September 2025**

ODESA 2025

MODERN CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE
COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS
ISSN 2786-6696 (print) ISSN 2786-670X (online)

Issue № 13, September 2025

Collection of scientific works has been published under name “Modern construction and architecture” since 2022, frequency – 4 times a year.

The previous title of the collection – Bulletin of Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, since 2000.

Founder and publisher – Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture (OSACEA), Odesa.
Certificate of state registration KB №25221-15161ПП, 10 June, 2022.

Collection of scientific works enters the list of scientific editions of Ukraine, in which thesis results can be published. Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 1643, 28 December, 2019 (category B).

Since 2016 collection of scientific works is indexed into International scientometric base of the Index Copernicus.

Results of scientific and experimental-theoretical researches in the field of construction and architecture; building structures, building materials and techniques; hydrotechnical and transport construction; utility networks and facilities; basement and foundations; technology and organization of building production are presented in the collection.

It is assigned for scientific workers, specialists of design organizations and manufacturing enterprises of construction domain, postgraduates, masters of educational institutions.

Editor-in-chief – Vyrovoy V.N. – D.Sc., Professor, OSACEA;

Executive editor – Kroviakov S.O. – D.Sc., Associate Professor, OSACEA;

Executive Secretary – Antoniuk N.R. – Ph.D., Associate Professor, OSACEA.

Editorial Board:

Azizov T.N. – D.Sc., Professor, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical;

Goryk O.V. – D.Sc., Professor, Poltava State Agrarian Academy;

Klymenko Y.V. – D.Sc., Professor, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture;

Kryvenko P.V. – D.Sc., Professor, Scientific Research Institute for Binders and Materials named after V.D.Glukhovsky

Krutii Yu.S. – D.Sc., Professor, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture;

Lyashenko T.V. – D.Sc., Professor, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture;

Menelyuk O.I. – D.Sc., Professor, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture;

Plugin A.A. – D.Sc., Professor, Ukrainian State University of Railway Transport;

Sanytsky M.A. – D.Sc., Professor, Lviv Polytechnic National University;

Surianinov M.G. – D.Sc., Professor, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture;

Shynkevych O.S. – D.Sc., Professor, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture;

Czarnecki Lech – Professor, Instytut Techniki Budowlanej, ITB, Warsaw;

Iskhakov Iakov – Ph.D., Professor, Ariel University, Ariel, Israel;

Fischer Hans-Bertram – Dr.-Ing., Bauhaus-Universität, Weimar, Germany;

Kozina Goran – Professor, University North, Croatia;

Milkovic Marin – Ph.D., University North, Croatia;

Ramanathan Hareesh N – Dr., Professor, Toc H Institute of Science and Technology, Arakkunnam, Kochi, Kerala, India;

Ribakov Y.I. – Ph.D., Professor, Ariel University, Ariel, Israel;

Slapac Mariana – Dr. Habilitat of Art, Cultural Heritage Institut, Chisinau, Moldova.

Technical editorship:

Zaytceva J.Y. – Ph.D., Associate Professor, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture;

Recommended for publication by the Academic Board of the OSACEA

Protocol № 2, 18 September, 2025.

Certificate KB №25221-15161ПП, 10 June, 2022.

Order of Ministry of Education and Science of Ukraine № 1643, 28 December, 2019 (category B).

ISSN 2786-6696 (print)

ISSN 2786-670X (online)



This work © 2025 by Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture is licensed under [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ЗМІСТ

АРХІТЕКТУРА

| | |
|--|----|
| Голіус В.А. Рейтингові системи екологічної сертифікації архітектури в Україні: сучасний стан проблеми | 9 |
| Зібров З.К., Кудряшова І.В. Фактори формування житлових районів у Харкові: історико-просторовий аналіз XVII-XVIII ст. | 20 |
| Опришко Р.А. Особливості висвітлення проблем формування багатофункціональних громадських будівель у вітчизняних наукових джерелах: комунікативні та функціональні аспекти... | 31 |
| Чаговець О.В. Автентичність 30 років потому у контексті Нарської конференції 1994. | 39 |
| Шушляков Д.О., Шушлякова О.С. Елементи природоінтегрованої архітектури – рекреаційні зони на покрівлях із використанням рекуперативної теплоти систем вентиляції. | 48 |

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

| | |
|---|----|
| Безнюк Л.І., Романюк Є.В., Романюк В.В., Супрунюк В.В., Зятюк Ю.Ю. Нелінійне моделювання обпирання перфорованих балок на оголовки колон. | 57 |
| Бідаков А.М., Пустовойтова О.М., Єфимович В.Ю. Легкі клеєфанерні панелі із зігнутими Х-подібними повздовжніми ребрами жорсткості | 68 |
| Мурашко О.В., Крючков К.А., Волощук В.В., Петраш А.С. Сейсмостійкість великопанельних будинків у сейсмічних районах. Ретроспективний аналіз нормативної бази. | 80 |
| Панченко С.В., Редько І.О., Лобяк О.В., Дудін О.А. Дослідження стійкості навісних вентилятованих фасадів до динамічних та вібраційних впливів. | 88 |
| Перпері А.О., Вакуленко В.В. Аналітичний метод розрахунку функціонально-градієнтних балок, що опираються на пружну основу Вінклера. | 99 |

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

| | |
|---|-----|
| Сопов В.П., Андрух С.Л. Формування мікроструктури цементного каменю в присутності комплексних хімічних добавок. | 109 |
|---|-----|

ІНЖЕНЕРНІ МЕРЕЖІ ТА ОБЛАДНАННЯ

| | |
|--|-----|
| Чемеринський Я.Р., Возняк О.Т. Ефективність повітророзподілу лінійним щілинним дифуззором в неізотермічних умовах... | 117 |
|--|-----|

ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Атинян А.О., Савченко О.І., Камчатна С.М., Рибачук О.В., Назарько О.О.

Технологія відновлення закладів освіти після руйнувань внаслідок збройного конфлікту на території України..... 125

Вимоги до оформлення статей у збірнику Сучасне будівництво та архітектура..... 133

CONTENTS

ARCHITECTURE

- Holius V.A.**
Green standards in Ukraine: current state of the problem..... 9
- Zibrov Z.K., Kudriashova I.V.**
Factors in the formation of residential districts in Kharkiv: a historical and spatial analysis of the 17th–18th centuries..... 20
- Opryshko R.A.**
Coverage features of the multifunctional public buildings formation problems in domestic scientific sources: communication and functional aspects..... 31
- Chahovets O.**
Authenticity 30 years later in the context of the 1994 Nara conference..... 39
- Shushliakov D.O., Shushliakova O.S.**
Elements of nature-integrated architecture – recreational areas on the roofs using the recuperative heat of ventilation systems..... 48

BUILDING STRUCTURES

- Bezniuk L.I., Romaniuk Y.V., Romaniuk V.V., Supruniuk V.V., Ziatyuk Y.Y.**
Nonlinear modeling of supporting perforated beams on column heads..... 57
- Bidakov A.M., Pustovoitova O.M., Yefymovych V.**
Lightweight plywood panels with curved X-shaped longitudinal ribs of rigidity..... 68
- Murashko O.V., Kriuchkov K.A., Voloshchuk V.V., Petrash A.S.**
Seismic resistance of large-panel buildings in seismic regions. Retrospective analysis of regulatory framework..... 80
- Panchenko S.V., Redko I.O., Lobiak O.V., Dudin O.A.**
Research on the resistance of ventilated rainscreen facades to dynamic and vibrational loads... 88
- Perperi A., Vakulenko V.**
An analytical method for the analysis of functionally graded beams resting on a Winkler elastic foundation..... 99

BUILDING MATERIALS AND TECHNIQUES

- Sopov V.P., Andruk S.L.**
Formation of cement stone microstructure in the presence of complex chemical admixtures... 109

UTILITY NETWORKS AND FACILITIES

- Chemerynskyi Y., Voznyak O.**
Air distribution efficiency with a linear slot diffuser in non-isothermal conditions..... 117

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF BUILDING PRODUCTION

Atynian A.O., Savchenko O.I., Kamchatna S.M., Rybachuk O.V., Nazarko O.O.

Technology of educational institutions' reconstruction after destruction caused by armed conflict on the territory of Ukraine rigidity..... 125

Requirements for the articles formation in collection Modern construction and architecture..... 133

GREEN STANDARDS IN UKRAINE: CURRENT STATE OF THE PROBLEM

Holius V.A., postgraduate,
ottobisma@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9116-4665
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
17, Chornoglazivska Street, Kharkiv, 61002, Ukraine

Abstract. This article provides a comprehensive analysis of the current state of green standards implementation within Ukraine's construction industry. The study's relevance is underscored by global challenges, including climate change, natural resource depletion, and urbanization, which necessitate a transformative shift in the construction sector to achieve the Sustainable Development Goals (SDGs). Global practice consistently demonstrates the effectiveness of international certification systems such as LEED, BREEAM, and DGNB in reducing emissions, optimizing energy consumption, improving environmental quality, and fostering sustainable urban environments. However, despite isolated positive examples, the widespread adoption of these standards in Ukraine remains limited. This is primarily due to the absence of a comprehensive national "green" standard, one that is fully adapted to local conditions and effectively integrated into the state regulatory framework. While Ukraine's existing regulatory and legal framework contains fragmented provisions concerning energy efficiency and ecological design, it currently lacks a cohesive, systemic approach to green architectural practices. Particular attention is drawn to the imperative of adapting international best practices to Ukraine's specific socio-economic conditions and regional characteristics.

The research employed a comprehensive methodological approach. This encompassed a systematic analysis of Ukraine's regulatory framework pertaining to ecological construction, a comparative analysis of leading international green standards (LEED, BREEAM, DGNB) and their correlation with the United Nations Sustainable Development Goals, and an empirical analysis of the market for ecologically certified buildings in Ukraine as of April 2025.

The findings indicate that Ukraine has established a foundational regulatory framework that addresses certain aspects of ecological building certification, particularly in areas like thermal insulation, energy efficiency, and resource metering. A review of relevant laws, state building norms (DBNs), and ministerial orders confirms the government's aspiration to integrate sustainable development principles. Furthermore, international green standards (LEED, BREEAM, DGNB) demonstrate a high degree of alignment with the SDGs, encompassing their environmental, social, and economic dimensions. The analysis of the market for certified properties revealed a limited number of completed projects (only a few dozen), predominantly concentrated within the public and office building segments in major cities, while the residential sector remains largely untouched by "green" certification.

The study confirms the existence of significant challenges, yet simultaneously highlights substantial potential for the advancement of green building in Ukraine. There is a clear need for the development of a holistic national green standard specifically tailored to Ukrainian peculiarities. Additionally, the establishment of a unified national register for certified buildings is crucial for data systematization and promoting ecological standards among developers and the general public. The systemic implementation of green standards in Ukraine must be grounded in a robust legislative framework, the integration of international experience, adherence to SDGs, and scientifically substantiated adaptation to the national context.

Future research will focus on developing a template for a national green standard that accounts for regional specificities and incorporates the visual and aesthetic qualities of architecture into its criteria.

Keywords: green standards, LEED, BREEAM, DGNB, ecological certification, sustainable development, Sustainable Development Goals.

Introduction. In the context of global challenges related to climate change, rapid urbanization, and depletion of natural resources, the construction industry stands out as one of the key sectors capable of significantly contributing to the achievement of sustainable development goals. International experience has shown that the implementation of green standards – certification systems that address environmental, economic, and social aspects of construction – is an effective tool for reducing carbon emissions, optimizing energy consumption, improving quality of life, and promoting the ecological transformation of urban environments. Among the most widely recognized global certification systems are LEED (USA), BREEAM (United Kingdom), and DGNB (Germany), which are gradually gaining traction in Ukraine as well. However, despite successful case studies, the scale of green certification adoption at the national level remains limited.

One of the key problems is the absence of a comprehensive national green standard in Ukraine – one that would be adapted to local conditions and possibly integrated into the regulatory framework governing construction activities. Although a number of legal and regulatory documents addressing energy efficiency, environmental design, and the Sustainable Development Goals (SDGs) have emerged in recent years, these instruments often remain fragmented and are not yet consolidated into a unified certification tool. This complicates the development of a systemic approach to the ecological transformation of architecture.

Moreover, there is a pressing need to adapt existing international green standards to the Ukrainian market, taking into account local socio-economic conditions, housing needs, and regional specifics. The integration of ecological criteria into urban planning, architectural design, and engineering solutions requires both scientific and regulatory substantiation.

In this context, it is essential not only to assess the current state of green certification implementation in Ukraine, but also to identify regulatory gaps, explore the potential of a national approach, and justify the feasibility of developing a context-sensitive national green standard aligned with the Sustainable Development Goals.

Review of Recent Studies and Publications. Within the growing interest in green construction in Ukraine, a number of studies have addressed various aspects of this field. T.I. Kryvomaz, A.P. Kulykov, and O.V. Petrochenko emphasized the importance of sustainable construction for preserving water resources, noting that the construction industry accounts for about 14% of drinking water use. They argue that implementing green technologies could substantially reduce this figure [1].

O.V. Hlushakova, O.H. Zhukova, and N.V. Nehoda examined ecological management and planning in green construction. Their work includes methodological recommendations for students specializing in environmental protection technologies, thereby contributing to the training of professionals in the field [2].

H. Kovalska and O. Homon focused on the integration of green architecture into the educational process, particularly through the use of green roofs and vertical farms. These practices help foster ecological thinking among future architects [3].

A series of regular international conferences, such as "Green Construction," hosted by Kyiv National University of Construction and Architecture, facilitates knowledge exchange between researchers, business representatives, and policymakers regarding the implementation of sustainable technologies [4].

A study published in the journal *Ecological Safety and Environmental Management* analyzed trends in green construction in Ukraine and Poland, emphasizing the need for government support and a favorable investment climate to further develop this sector [5].

Collectively, these works highlight increasing interest in sustainable construction in Ukraine, confirming its importance for sustainable development and the need for further research and practical implementation. Moreover, the integration of green building topics into academic curricula underscores their long-term significance for the professional training of architects and planners.

Purpose and Objectives. The aim of this study is to analyze the existing legal and regulatory framework in Ukraine and to justify the development of a conceptual model for a national green building standard. To achieve this aim, the following objectives were defined:

- to analyze Ukraine’s legal and regulatory documents related to sustainable construction;
- to examine the relationship between green certification criteria and the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs);
- to assess the current market for green-certified buildings in Ukraine, including their typological characteristics.

Materials and Methods. This research employs an interdisciplinary methodology that integrates theoretical analysis and empirical data collection to address the objectives outlined above.

The study draws on the following materials:

- Ukrainian legal and regulatory documents, including laws, state building codes (DBNs), ministerial orders, and Cabinet of Ministers resolutions related to energy efficiency, environmental design, and the UN Sustainable Development Goals. A full list of analyzed documents is provided in the bibliography;

- official data from international green certification systems, particularly from the databases and reports of LEED (U.S. Green Building Council), BREEAM (Building Research Establishment), and DGNB (German Sustainable Building Council) concerning certified buildings in Ukraine.

The methodology consists of the following components. *Systematic analysis of legal regulations.* A comprehensive review was conducted of existing Ukrainian legislation and regulatory frameworks to assess their compliance with environmental design principles and the SDGs. Logical and comparative methods were applied to evaluate the scope and consistency of various legal documents.

Comparative analysis of international green standards. The study juxtaposed key criteria of the LEED, BREEAM, and DGNB systems with the UN SDGs. *Content analysis* was used to identify correlations between certification standards and specific SDG targets. *Generalization techniques* were employed to derive conclusions about their interconnection.

Market analysis of green-certified buildings in Ukraine. The current state of Ukraine’s green certification market as of April 2025 was assessed using official data from the certification systems. Typological analysis was conducted to identify the dominant building types undergoing certification (e.g., office, retail, residential). Statistical analysis was applied to quantify and evaluate trends in the number of certified projects.

Synthesis and generalization. Based on the collected data and analysis, conclusions were formulated regarding the current state of green certification in Ukraine, gaps in the legal framework were identified, and a rationale for developing a national green standard was presented.

These methodological approaches ensured a comprehensive examination of the subject and enhanced the validity of the study’s findings.

Research Findings. *Legal Framework for Environmentally Responsible Building Design in Ukraine.* Ukraine has already established a foundational legal and regulatory framework that partially governs the environmental assessment and certification of buildings. This legislative base can serve as a platform for the development of a national green building certification system – a Ukrainian green standard.

Key documents currently forming the legal basis for integrating environmental principles into construction practices include:

- DBN B.2.6-31:2021 "Thermal insulation and energy efficiency of buildings", which defines performance requirements for building insulation in accordance with modern energy-saving standards [6].

- DBN B.1.2-11:2021 "Energy saving and energy efficiency", a document that sets out general principles to ensure energy efficiency at all stages of a building’s lifecycle [7].

- The Law of Ukraine "On Energy Efficiency of Buildings" (2017, updated 2024), which provides criteria for energy certification and the assessment of buildings energy performance [8].

- The Law "On the Energy Efficiency Fund" (2017, revised 2024), which defines mechanisms for financing energy modernization initiatives [9].

- The Law "On Commercial Accounting of Heat and Water Supply" (2017, updated 2025), which establishes mandatory metering of utility consumption in buildings [10].

– Order of the Ministry for Regional Development, Construction, and Housing and Communal Services of Ukraine (2018, amended in 2021) "On Approval of the Procedure for Independent Monitoring of Energy Certificates". This order outlines the procedures for conducting independent control over energy certificates [11].

– Order of the Ministry for Regional Development, Construction, and Housing and Communal Services of Ukraine (2018, updated in 2025) "On Approval of the Procedure for Conducting Energy Efficiency Certification and the Form of the Energy Certificate". This document establishes the practical framework for implementing energy efficiency assessments [12].

– Law of Ukraine (2019) "On the Basic Principles (Strategy) of the State Environmental Policy until 2030". This law outlines the fundamental directions of the country's environmental transformation [13].

– Presidential Decree No. 722 (2019) "On the Sustainable Development Goals of Ukraine until 2030". This decree adapts the UN Sustainable Development Goals to the national context [14].

– Order of the Ministry for Communities and Territories Development (2020) "On Approval of Minimum Energy Efficiency Requirements for Buildings". This order establishes the minimum energy efficiency criteria for construction projects [15].

– Cabinet of Ministers Decree (2020, updated in 2023) "On Approval of the Concept for Implementing State Policy in the Field of Ensuring Energy Efficiency of Buildings in the Part of Increasing the Number of Nearly Zero-Energy Buildings and the National Plan for Increasing the Number of Such Buildings". This decree approves both the concept and the National Plan for the widespread implementation of nearly zero-energy buildings [16].

– Law of Ukraine (2022, updated in 2024) "On Energy Efficiency". This law unifies approaches to energy consumption management [17].

– Law of Ukraine (2023, updated in 2024) "On Amendments to Certain Laws of Ukraine to Create Conditions for Comprehensive Thermal Modernization of Buildings". This legislative act promotes large-scale energy-saving renovations [18].

– Cabinet of Ministers Decree (2024) "Certain Issues Concerning the Achievement of the Sustainable Development Goals in Ukraine". This document coordinates state policy in the context of implementing the Sustainable Development Goals [19].

This set of regulatory and legal documents reflects the state's intention to integrate the principles of sustainable development into the urban planning and architectural spheres, thereby forming a foundation for the further advancement of environmentally responsible practices in construction.

Consideration of Sustainable Development Goals in the Context of Legal Regulation of Environmental Certification. The effectiveness of implementing green standards largely depends on the systematic integration of regulatory requirements with national strategic guidelines in the field of sustainable development. Such an approach ensures not only compliance of architectural projects with current norms, but also their long-term resilience in accordance with the global development agenda.

It is important to emphasize that the Sustainable Development Goals (SDGs), adopted by the United Nations resolution "Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development" (2015), have been reflected in Ukrainian legislation. In particular:

– According to the Presidential Decree of Ukraine No. 722 of 2019 "On the Sustainable Development Goals of Ukraine until 2030" [14], the state has undertaken official obligations to integrate the principles of sustainable development into policies and strategies at the national, regional, and sectoral levels.

– The Law of Ukraine "On the Basic Principles (Strategy) of the State Environmental Policy of Ukraine until 2030" [13] outlines the directions of environmental governance that align with the Global SDGs, particularly in the areas of energy efficiency, rational resource use, and adaptation to climate change.

One of the key features of green building standards is their ability to encompass all three core pillars of sustainable development: environmental, social, and economic.

Environmental dimension. Green standards include design and operational measures aimed at minimizing the negative environmental impact of buildings. This is achieved through improved

energy efficiency, reduced CO₂ emissions, optimized water usage, use of environmentally friendly materials, and waste reduction. These approaches not only align with national environmental policies but also contribute to achieving the goals of sustainable natural resource management. For example, SDG 6 "Clean Water and Sanitation" aims to ensure equal access to safe and affordable water, improve water quality, increase water-use efficiency, and protect and restore water ecosystems [20]. Green standards support efficient water use through conservation technologies, water quality control, irrigation solutions, and wastewater treatment.

Social dimension. Green standards assess the quality of the architectural environment in terms of comfort, safety, accessibility, and health impacts on users (residents). This includes aspects such as natural lighting, ventilation, acoustic comfort, ergonomics, and inclusivity. As a result, environmental certification fosters favorable living and working conditions, enhancing well-being and aligning with the principle of social equity in sustainable development. For instance, SDG 3 "Good Health and Well-being" seeks to reduce maternal mortality, combat epidemics such as tuberculosis and malaria, and lower child and neonatal mortality rates [21]. Green standards evaluate indoor air quality, acoustic and visual comfort, as well as the use of non-toxic materials and finishes.

Economic dimension. Although implementing green standards often involves higher initial investments, the long-term economic return is achieved through reduced operational costs, energy savings, increased real estate value, and greater investment attractiveness. For example, SDG 9 "Industry, Innovation and Infrastructure" focuses on developing quality, reliable, and sustainable infrastructure for economic growth, promoting inclusive industrialization, supporting domestic technologies, and expanding access to ICTs [22]. Green standards actively integrate IT solutions not only at the design stage but also throughout building operation. Additionally, some certification systems award points specifically for innovative solutions.

Thus, green standards are not merely technical regulations, but a comprehensive tool integrating architectural practice into the broader paradigm of sustainable development. Their implementation allows buildings to not only respond to contemporary challenges but also generate long-term environmental, social, and economic benefits.

Moreover, modern certification systems clearly trace the correlation between specific SDGs and the corresponding credits and criteria of green standards.

For instance, the LEED system demonstrates a direct alignment between assessment criteria and the SDGs, particularly SDGs 3, 6-13, 15, and 17 [23]. For example, SDG 3 "Good Health and Well-being" is reflected in the Indoor Environmental Quality criteria, while SDG 13 "Climate Action" is covered by requirements that account for 35 out of 100 possible points in the overall building rating (see Fig. 1).

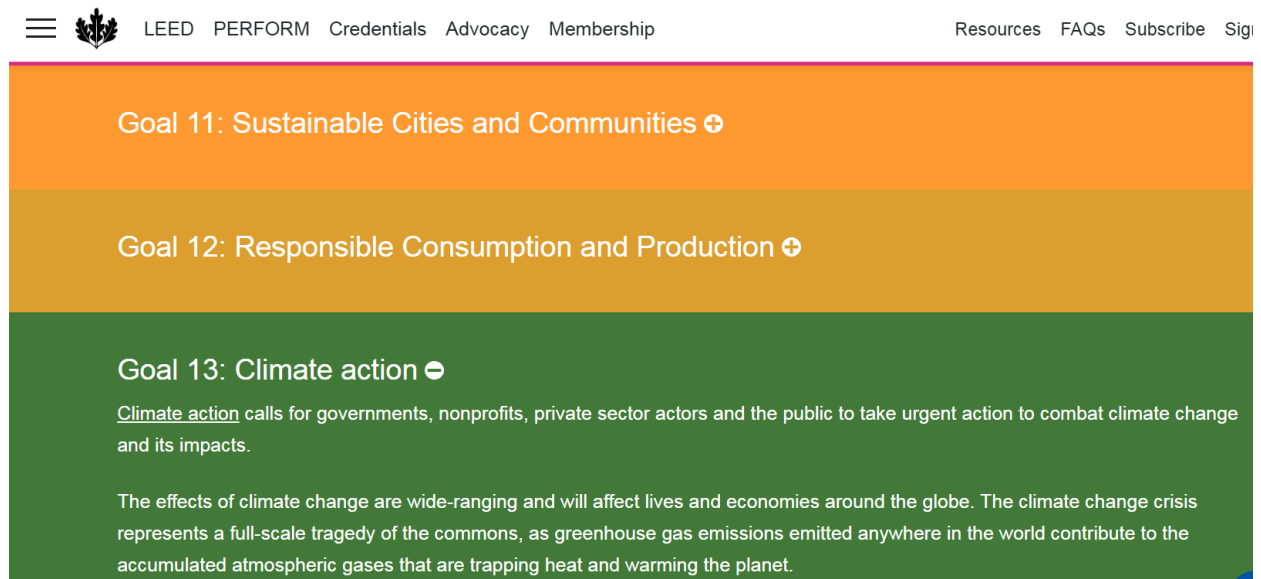


Fig. 1. Alignment of SDGs in the LEED System

The BREEAM system also aligns with global Sustainable Development Goals, covering SDGs 1-4, 7-9, and 11-16 [24]. For example, SDG 1 "No Poverty" is addressed by ensuring equal access to economic, natural, and financial resources, and strengthening resilience to social, economic, and environmental shocks (see Fig. 2).

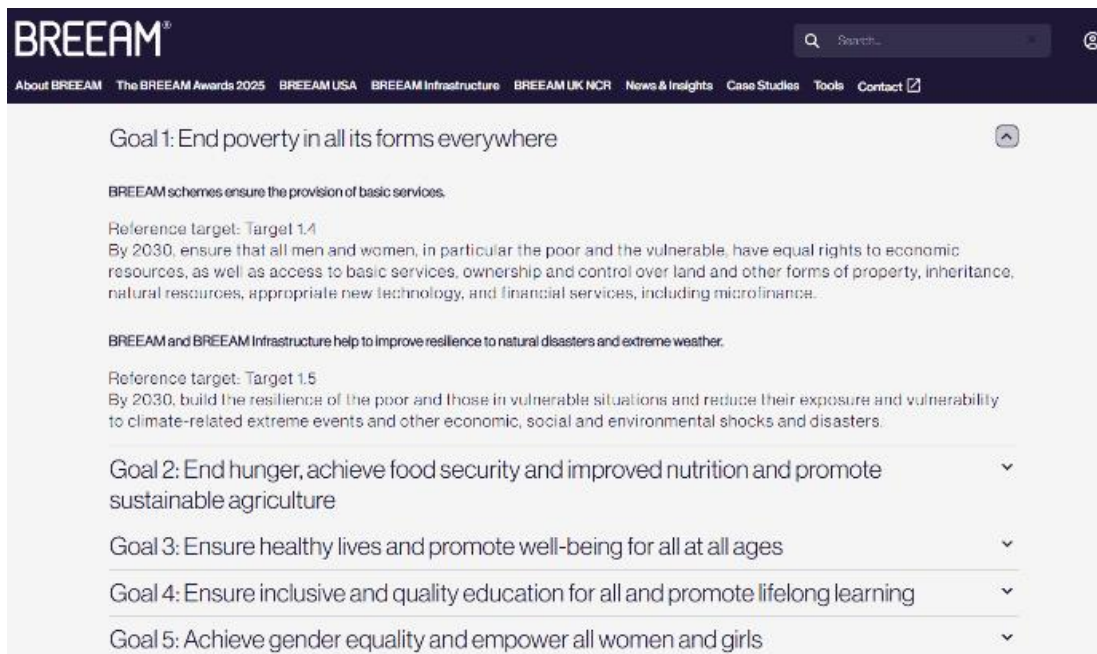


Fig. 2. Alignment of SDGs in the BREEAM System

The DGNB system conducted an internal analytical study to identify intersections between its certification criteria and the SDGs [25]. Results confirmed that DGNB addresses 15 out of the 17 Sustainable Development Goals, underlining its comprehensive scope (see Fig. 3).



Fig. 3. Alignment of SDGs in the DGNB System

Other certification systems such as WELL, Green Globes, and HQE also explicitly emphasize the correlation between their credits and the SDGs.

Assessment of the Current State of Green Building Certification Systems Implementation in Ukraine. To identify the key characteristics, trends, and typological features of certified projects, an analysis of the green certification market for architectural projects in Ukraine was conducted as of

April 2025. The study revealed that the number of implemented or certified projects remains at a few dozen, with several others in the process of certification or having submitted applications.

Currently, three major international certification systems are represented in the Ukrainian market: the American LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), the British BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), and the German DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen). To provide a detailed overview of the market structure and to monitor current trends, let us examine the list of certified buildings.

According to LEED [26], eight projects are officially registered in Ukraine:

- The Shell office located in the Toronto-Kyiv multifunctional complex (Kyiv) – the first project in Ukraine to receive the LEED ID+C: Commercial Interiors certificate (2013).
- The U.S. Embassy in Ukraine "NOX Kyiv" (Kyiv), certified under LEED BD+C: New Construction (2014).
- Business campus B12 of the UNIT.City innovation park (Kyiv), certified under LEED BD+C: Core and Shell (2019).
- Business campuses B9-B10 at UNIT.City (Kyiv), also certified under LEED BD+C: Core and Shell (2020).
- Business campus B11 at UNIT.City (Kyiv), certified under LEED BD+C: Core and Shell (2021).
- Chanel boutique at Mandarin Plaza (Kyiv), certified under LEED ID+C: Retail (2021).
- Building B01 of the LvivTech.City innovation park (Lviv), certified under LEED BD+C: Core and Shell (2023).
- The Takeda company office (Kyiv), certified under LEED ID+C: Commercial Interiors (2023).
- Additionally, reports mention the recent certification of Mag.nett Business Center and K/MOST Business Center in Kyiv [27].

According to BREEAM [28], five certified projects are officially registered in Ukraine:

- Astarta Business Center (Kyiv), certified under BREEAM 2013 New Construction: Offices. Interim (2016) and BREEAM 2013 New Construction: Offices. Final (2018).
- Forum Lviv Shopping Mall (Lviv), certified under BREEAM 2009 Europe Commercial: Retail (2018).
- Diadans Residential Development (Kyiv), certified under BREEAM 2016 New Construction: Residential (2020).
- Winner Renault car dealership (Kyiv), certified under BREEAM 2016 New Construction: Commercial (2021).
- Silpo Re Cycling supermarket (Kyiv), certified under BREEAM 2016 New Construction: Commercial (2022).

Additional BREEAM-certified projects include:

- Optima Plaza Business Park (Lviv), certified under BREEAM In-Use International [29] (2017).
- Eurasia Business Center (Kyiv), certified under BREEAM In-Use [30] (2020).
- Prime Business Center (Kyiv), certified under BREEAM In-Use [31] (2020).
- Grand Business Center (Kyiv), also certified under BREEAM In-Use [32] (2020).
- Horizon Park Business Center (Kyiv), certified under BREEAM In-Use International [33] (2020).

According to the DGNB system [34], only one certified project is officially registered in Ukraine – a Billa supermarket operated by an Austrian retail chain (2014).

The analysis of these data indicates that the number of certified buildings in Ukraine remains limited. However, there is a growing interest in green standards. It is also noteworthy that most certified projects are public or commercial buildings, while the residential sector remains largely unaffected by green certification initiatives.

In light of these circumstances, the author suggests the initiation of a unified national register of buildings certified under green standards. This would support information systematization,

monitoring of certification processes, and promotion of environmental standards among developers and the wider public.

Conclusions. The conducted study confirms the existence of both challenges and prospects for the development of green building in Ukraine. The analysis of the regulatory and legal framework indicates that there are individual legislative initiatives at the national level related to energy efficiency, emission reduction, and climate change adaptation. However, Ukraine still lacks a comprehensive national green standard that would take into account the specifics of the local market, construction sector, and climatic conditions.

The assessment of certified green buildings shows that the number of projects recognized by international certification systems (LEED, BREEAM, DGNB) remains limited and is concentrated mainly in large cities and within commercial or office real estate. Residential buildings, in contrast, are almost entirely absent from the green certification landscape.

The comparative analysis of green standard criteria and the UN Sustainable Development Goals demonstrates that these systems promote the achievement of environmental, economic, and social targets. Given that the SDGs have been officially incorporated into Ukrainian legislation, it would be reasonable for a future national green standard to explicitly reflect these goals.

Furthermore, the study supports the initiative to establish a national certification system tailored to local needs, as well as a public register of certified buildings. Such measures would not only enhance transparency but also increase awareness of and demand for environmentally responsible construction among professionals and the general public.

In summary, the systematic implementation of green standards in Ukraine should rely on a comprehensive legislative base, integration of international experience, alignment with the SDGs, and context-specific scientific adaptation.

Future research will focus on developing a conceptual framework for a national green standard adapted to the regional context. According to global trends, this should also incorporate aesthetic and visual qualities of architecture as evaluation criteria.

References

- [1] T.I. Kryvomaz, A.P. Kulikov, and O.V. Petrochenko, "Zelene budivnytstvo dlia zberezhennia vodnykh resursiv", *Materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Voda dlia vsikh"*, Kyiv: IVPМ, 2019, pp. 213–214.
- [2] O.V. Hlushakova, O.H. Zhukova, and N.V. Nehoda, *Ekolohichne upravlinnia ta planuvannia v zelenomu budivnytstvi*. Kyiv, KNUBA, 2019. [Online]. Available: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/245b8a6d-2a6d-4253-9792-b0289fb53809/content>. Accessed on: June 19, 2025.
- [3] H.L. Kovalska and O.O. Homon, "Priiomy vprovadzhennia zelenoi arkhitektury v osvithomu protsesi", *International Journal of Scientific Knowledge*, no. 7, pp. 66–74, 2024. DOI: 10.32347/2786-7269.2024.7.66-74.
- [4] Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia "ZELENE BUDIVNYTSTVO", Kyiv, KNUBA, 2024. [Online]. Available: <https://www.knuba.edu.ua/kafedra-texnologij-zaxistu-navkolishnogo-seredovishha-ta-oxoroni-praci/mizhnarodna-naukovo-praktychna-konferencziya-zelene-budivnytstvo-green-construction/> Accessed on: June 19, 2025.
- [5] T. Kryvomaz, J. Chmielewska, and T. Kanashchuk, "Perspektyvy rozvytku zelenoho budivnytstva v Ukraini na prykladi Polshchi", *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, no. 4 (36), pp. 20–31, 2020. [Online]. Available: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/98cfa2cd-cc5f-4769-855e-8dfef2e8bad3/content>. Accessed on: June 19, 2025.
- [6] DBN V.2.6-31:2021. Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel. Kyiv: Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2022. [Online]. Available: https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2022/08/DBN-V_2_6-31-2021.pdf. Accessed on: June 19, 2025.

- [7] DBN V.1.2-11:2021. Osnovni vymohy do budivel i sporud. Enerhozberezhennia ta enerhoefektyvnist. Kyiv: Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2022. [Online]. Available: https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2022/08/DBN-V_1_2-11-2021.pdf. Accessed on: June 19, 2025.
- [8] Zakon Ukrainy. Pro enerhetychnu efektyvnist budivel, no. 2118-VIII, Jun. 22, 2017. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>. Accessed on: June 19, 2025.
- [9] Zakon Ukrainy. Pro Fond enerhoefektyvnosti, no. 2095-VIII, Jun. 8, 2017. [Online]. Available: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73510. Accessed on: June 19, 2025.
- [10] Zakon Ukrainy. Pro komertsiiyni oblik teplovoi enerhii ta vodopostachannia, no. 2119-VIII, Jun. 22, 2017. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2119-19#Text>. Accessed on: June 19, 2025.
- [11] Nakaz Ministerstva rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. Pro zatverdzhennia Poriadku nezalezhnogo monitoringu enerhetychnykh sertufikatov, no. 276, Oct. 18, 2018. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1323-18#Text>. Accessed on: June 19, 2025.
- [12] Nakaz Ministerstva rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. Pro zatverdzhennia Poriadku provedennia sertufikatsii enerhetychnoi efektyvnosti ta formy enerhetychnoho sertufikata, no. 172, Jul. 11, 2018. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0825-18#Text>. Accessed on: June 19, 2025.
- [13] Zakon Ukrainy. Pro Osnovni zasady (stratehiiu) derzhavnoi ekolohichnoi polityky Ukrainy na period do 2030 roku, no. 2697-VIII, Feb. 28, 2019. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>. Accessed on: June 19, 2025.
- [14] Ukaz Prezydenta Ukrainy. Pro Tsili staloho rozvytku Ukrainy na period do 2030 roku, no. 722/2019, Sep. 30, 2019. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text>. Accessed on: June 19, 2025.
- [15] Nakaz Ministerstva rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy. Pro zatverdzhennia Minimalnykh vymoh do enerhetychnoi efektyvnosti budivel, no. 260, Oct. 27, 2020. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20#Text>. Accessed on: June 19, 2025.
- [16] Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy. Pro skhvalennia Kontseptsii realizatsii derzhavnoi polityky u sferi zabezpechennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel u chastyni zbilshchennia kilkosti budivel z blyzkym do nulovoho rivnem spozhyvannia enerhii ta zatverdzhennia Natsionalnoho planu zbilshchennia kilkosti budivel z blyzkym do nulovoho rivnem spozhyvannia enerhii, no. 88-r, Jan. 29, 2020. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/88-2020-%D1%80#Text>. Accessed on: June 19, 2025.
- [17] Zakon Ukrainy. Pro enerhetychnu efektyvnist, no. 1818-IX, Oct. 21, 2021. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>. Accessed on: June 19, 2025.
- [18] Zakon Ukrainy. Pro vnesennia zmin do deiakykh zakoniv Ukrainy shchodo stvorennia umov dlia zaprovadzhennia kompleksnoi termomodernizatsii budivel, no. 2392-IX, Jul. 9, 2022. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2392-20#Text>. Accessed on: June 19, 2025.
- [19] Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy. Deiaki pytannia zabezpechennia dosiahnennia Tsilei staloho rozvytku v Ukraini, no. 1190-r, Nov. 29, 2024. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1190-2024-%D1%80#Text>. Accessed on: June 19, 2025.
- [20] Sustainable Development Goal 6: Clean Water and Sanitation. United Nations Development Programme (UNDP). [Online]. Available: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals/clean-water-and-sanitation>. Accessed on: June 19, 2025.
- [21] Sustainable Development Goal 3: Good Health and Well-being*. United Nations Development Programme (UNDP). [Online]. Available: <https://www.undp.org/sustainable>

- [development-goals/good-health](#). Accessed on: June 19, 2025.
- [22] Sustainable Development Goal 9: Industry, Innovation and Infrastructure. United Nations Development Programme (UNDP). [Online]. Available: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals/industry-innovation-and-infrastructure>. Accessed on: June 19, 2025.
- [23] Synergies Between LEED and the Sustainable Development Goals. U.S. Green Building Council (USGBC). [Online]. Available: <https://www.usgbc.org/resources/synergies-between-leed-and-sdgs>. Accessed on: June 19, 2025.
- [24] Sustainable Development Goals and BREEAM. BRE Global. [Online]. Available: <https://breeam.com/about/sustainable-development-goals>. Accessed on: June 19, 2025.
- [25] Building a Better World: New DGNB Report on the Sustainable Development Goals. German Sustainable Building Council (DGNB), Mar. 3, 2021. [Online]. Available: <https://www.dgnb.de/en/making-the-most-of-dgnb/newsroom/press/article/building-for-a-better-world-new-dgnb-report-on-the-sustainable-development-goals>. Accessed on: June 19, 2025.
- [26] LEED Certified Projects in Ukraine. U.S. Green Building Council (USGBC). [Online]. Available: <https://www.usgbc.org/projects?Country=%5B%22Ukraine%22%5D>. Accessed on: June 19, 2025.
- [27] "Zelena" sertifikatsiia komertsii noi nerukhomosti aktyvno rozvyvaetsia v Ukraini, 100realty.ua, Feb. 2, 2022. [Online]. Available: <https://100realty.ua/uk/news/zelena-sertifikaciya-komeciynoi-nerukhomosti-aktivno-rozvivaetsya-v-ukraini>. Accessed on: June 19, 2025.
- [28] BREEAM Projects Map. BRE Global. [Online]. Available: <https://tools.breeam.com/projects/explore/map.jsp>. Accessed on: June 19, 2025.
- [29] Sertifikat BREEAM IN-USE INTERNATIONAL: Novyny ta podii nashoho biznes tsentru, OPTIMA PLAZA, Jul. 4, 2024. [Online]. Available: <https://optima-plaza.com.ua/sertyfikat-breeam-in-use-international/>. Accessed on: June 19, 2025.
- [30] Biznes-tsentr Yevraziia [Eurasia Business Center]. [Online]. Available: <https://eurasia-bc.com.ua/>. Accessed on: June 19, 2025.
- [31] Biznes-tsentr Praim [Prime Business Center]. [Online]. Available: <https://prime-bc.com.ua/>. Accessed on: June 19, 2025.
- [32] T. Antonuk and O. Babenko, "Zelena" sertifikatsiia nerukhomosti: mizhnarodnyi trend – ukrainska praktyka", iC consulent Ukraine, 2021. [Online]. Available: https://ic-consulenten.com.ua/wp-content/uploads/2021/03/CP210_Green-Certification.pdf. Accessed on: June 19, 2025.
- [33] Biznes-tsentr Horizont Park. [Online]. Available: <https://horizon-park.com.ua/>. Accessed on: June 19, 2025.
- [34] DGNB Certified Projects: BILLA Supermarket. German Sustainable Building Council (DGNB). [Online]. Available: <https://www.dgnb.de/en/certification/dgnb-certified-projects/project-details/billa-supermarket-commercial-entities-with-social-amenities-and-retail-space>. Accessed on: June 19, 2025.

РЕЙТИНГОВІ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ СЕРТИФІКАЦІЇ АРХІТЕКТУРИ В УКРАЇНІ: СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ

Голіус В.А., аспірант,

ottobisma@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9116-4665

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Чорноглазівська, 17, м. Харків, 61002, Україна

Анотація. В статті проаналізовано поточний стан впровадження зелених стандартів у будівельній галузі України. Актуальність дослідження зумовлена глобальними викликами (зміна клімату, виснаження ресурсів, урбанізація тощо), які вимагають адаптації будівельного

сектору для досягнення Цілей сталого розвитку (ЦСР). Світова практика доводить ефективність міжнародних систем сертифікації (LEED, BREEAM, DGNB та інших) для зниження викидів, оптимізації енергоспоживання, покращення якості середовища, кондицій людини тощо. Однак, попри окремі позитивні приклади, їхнє впровадження в Україні залишається обмеженим, в тому числі через відсутність повноцінного національного зеленого стандарту, адаптованого до місцевих умов. Існуюча українська нормативно-правова база, хоч і містить ряд положень щодо енергоефективності та екологічного проектування, не забезпечує при цьому системного підходу. Особлива увага приділяється необхідності адаптації міжнародного досвіду до соціально-економічних умов та регіональних особливостей України.

Методологія дослідження включає системний аналіз нормативно-правової бази України, пов'язаного з питаннями екологічного будівництва, аналіз кореляції міжнародних зелених стандартів (LEED, BREEAM, DGNB) з Цілями сталого розвитку ООН, а також емпіричний аналіз ринку екологічно сертифікованих будівель в Україні (станом на квітень 2025 року).

Результати показали, що в Україні сформовано певне нормативно-правове підґрунтя, яке регулює окремі аспекти екологічної сертифікації будівель, підтверджуючи прагнення держави до інтеграції принципів сталого розвитку. Міжнародні зелені стандарти, в свою чергу, демонструють високу відповідність Глобальним Цілям сталого розвитку, охоплюючи екологічну, соціальну та економічну складові. Аналіз ринку сертифікованих об'єктів виявив їх обмежену кількість (в межах кількох десятків проєктів), зосереджених переважно у громадському та офісному сегментах у великих містах, тоді як житловий фонд майже не охоплений рейтинговими системами екологічної сертифікації.

Дослідження підтверджує наявність проблем і значний потенціал для розвитку зеленого будівництва в Україні. Необхідна розробка цілісного національного зеленого стандарту, адаптованого до української специфіки, а також створення єдиного національного реєстру сертифікованих об'єктів для систематизації інформації та популяризації екологічних стандартів. Системне впровадження зелених стандартів має базуватися на комплексній законодавчій основі, інтеграції міжнародного досвіду, відповідності ЦСР та науково обґрунтованій адаптації до національного контексту.

Подальші дослідження планується спрямувати на формування концепту шаблону національного зеленого стандарту з урахуванням інтеграції візуальних й естетичних якостей архітектури.

Ключові слова: зелені стандарти, LEED, BREEAM, DGNB, екологічна сертифікація, сталий розвиток, цілі сталого розвитку.

Стаття надійшла до редакції 16.07.2025

Стаття прийнята до друку 28.07.2025

Дата публікації статті 24.09.2025

[This work by](#) © 2025 by [Holius V.A.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

**FACTORS IN THE FORMATION OF RESIDENTIAL DISTRICTS IN KHARKIV:
A HISTORICAL AND SPATIAL ANALYSIS OF THE 17TH–18TH CENTURIES**

¹**Zibrov Z.K.**, postgraduate,
zakhar.zibrov@kname.edu.ua, ORCID: 0009-0002-4841-7852
¹**Kudriashova I.V.**, PhD, Assistant Professor,
iryna.kudryashova@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3593-313X
¹*O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv*
17, Chornohlazivska str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Abstract. This article presents a historical and spatial analysis of the formation of residential districts in the city of Kharkiv, with a focus on the earliest stages of urban development. The study explores two key periods in the city's evolution: its founding as a Cossack fortress and its transformation into a Sloboda town. Rather than providing a full historical overview of Kharkiv's urban history, the research concentrates on the foundational phases of its residential spatial structure.

The introduction outlines the unique context of Kharkiv's growth, characterized by the combination of spontaneous settlement, adaptation to natural terrain, and shifts in city-forming functions. A significant proportion of the city's area remains occupied by low-rise private housing—tracing its origins to the Sloboda settlements of the 17th–18th centuries – which now faces challenges related to integration into the contemporary urban fabric. The research emphasizes the spatial conflicts that emerge at the interface between these historically formed districts and modern high-density development, which underscores the need for nuanced urban planning strategies.

The study aims to identify the core principles behind the formation of Kharkiv's residential areas and understand how natural conditions, military and administrative logics, and social stratification influenced spatial patterns. It employs an interdisciplinary methodology, combining architectural history, urban planning, cartographic analysis, and socio-geographic approaches. Historical maps, general plans, archival records, and previous academic research are used to trace the transformations of Kharkiv's urban form.

Key results include the identification of two primary spatial models: the fortified city of the mid-17th century and the Sloboda-type settlements that emerged in the late 17th and early 18th centuries. The fortress acted as a defensive-administrative nucleus, while Slobodas developed into semi-autonomous residential units with social, functional, and professional differentiation. Over time, the regular planning grid of the growing imperial city overlapped with the organic morphology of the Sloboda settlements, forming a complex, layered spatial structure. Particular attention is given to how landscape factors and social organization influenced settlement location, spatial hierarchy, and the internal logic of neighborhood planning.

The conclusion emphasizes that Kharkiv's development was not a linear progression from primitive to modern, but rather a process of accumulation and adaptation. The resulting urban morphology, shaped by multiple layers of socio-functional and territorial evolution, forms a valuable heritage and resource for future planning. The findings of the study can inform contemporary urban renewal policies by offering models for the integration of historic low-rise residential zones into the evolving structure of large cities, balancing spatial identity with the demands of modernization.

Keywords: residential districts, historic city, historical and spatial analysis, urban structure, social stratification, urban morphology, organic planning, Slobozhanshchyna, Sloboda settlement.

Introduction. The formation of residential districts within the structure of large historic cities is a multidimensional process shaped by a combination of environmental-geographic, social, economic, and cultural factors. Kharkiv, one of the largest urban centers in Ukraine, has undergone spatial development following a unique model that combines the spontaneity of initial settlement,

adaptation to natural topography, and the gradual transformation of functional zones. A distinctive feature of Kharkiv is the significant share of private low-rise residential (estate-type) development, which occupies more than half of the city's territory and originates from the earliest sloboda settlements.

At the present stage, under conditions of urban pressure, functional reorientation of city territories, and changes in the social structure, the traditional framework of residential districts is undergoing transformation. Challenges emerge in the integration of established low-rise neighborhoods into the structure of a contemporary metropolis. Many of these areas are now surrounded by highly urbanized zones – high-rise housing estates, commercial and business complexes, and transportation hubs. At the boundaries of these districts, conflicts often arise between existing residential typologies and new development functions, leading to unequal land use intensity and imbalances in transportation, social, and recreational infrastructure. As a result, there is an increasing risk of fragmentation of the urban fabric and deterioration of the living environment, both within these neighborhoods and in adjacent urbanized areas. Although estate-type housing remains a relevant and in-demand residential format, its current development is often not supported by sufficient analytical justification or professional planning.

In academic discourse, knowledge about the origins of residential district formation in Kharkiv remains insufficiently systematized – particularly in relation to the influence of shifting city-forming functions over time, as well as the roles of natural landscape conditions and socio-estate stratification. The absence of a generalized explanatory model for the patterns of such development prevents the creation of a coherent concept for integrating historical forms into contemporary urban planning. This underlines the relevance of the present study, which aims to identify the key principles that guided the formation of Kharkiv's residential districts as a foundation for the city's further sustainable development.

Review of Previous Research and Publications. The study of the spatial development of Kharkiv as a city begins with an analysis of historical sources, primarily cartographic materials from the 17th–18th centuries. The study of old city plans (Central State Historical Archives of Ukraine in Kharkiv) [1] allows us to trace the transition from the fortification structure of the Sloboda fortress to the beginnings of regular planning, which took shape during the period of imperial reforms.

A key source for studying this period is the monograph by D. I. Bahalii "Istoriia mista Kharkova" (1912), which provides a detailed account of the fortress's functions, the social structure of its residents, and the development of the slobodas around the fortified center [2]. An important supplement is the "Opys Kharkivskoho namisnytstva (late 18th century)", which contains information on administrative divisions, the nature of the development, population size, and economic activities [3, 4].

A. F. Paramonov, in a series of local history publications, investigates the historical topography and microgeography of Kharkiv, describing the location of ancient slobodas, trade squares, roads, and fortifications, thus providing valuable data on the physical structure of the city [5].

The dissertation by L. V. Kachemtseva "Stanovlennia arkhitekturno-proiektnoi spravy v mistakh Slobidskoi Ukrainy (second half of the 18th – early 20th century)" and works by A. L. Antonov and V. L. Masliichuk examine the history of Kharkiv's municipal governance and outline the stages of architectural project development in the cities of Slobozhanshchyna. They explore the impact of organizational forms on architectural development and urban environment formation [6].

V. V. Vecherskyi made a significant contribution to the study of architectural and urban development in Left-Bank Ukraine, including Kharkiv. In his monograph "Arkhitekturna ta mistobudivna spadshchyna doby Hetmanshchyny" [7], he examines the spatial organization of sloboda towns, the role of the landscape, the regimental-sotnia structure, and estate-based differentiation as factors in shaping the urban environment. In "Vtracheni obiekty kulturnoi spadshchyny Ukrainy" [8], Vecherskyi reconstructs lost developments, allowing for a deeper understanding of Kharkiv's historical environment. His approach combines historical-urban and environmental analysis, which is valuable for comprehensively studying the city's structure in the 18th century.

To gain a broader understanding of Kharkiv's processes, it is important to turn to European analogues. Foreign approaches to the study of residential district formation have also been analyzed.

An early conceptual foundation for urban spatial development was laid by Lewis Mumford in "The City in History" (1961) [9]. He viewed the city as a reflection of social order, where technology, politics, and culture shape architectural form and residential zoning. Particularly valuable is his analysis of the industrial city as a space of stratification.

Marcel Roncayolo, in his book "La Ville et ses territoires" (1990) [10], studied the city as a "symbolic fabric" in which political power, the church, and social classes determined the division into residential, administrative, and religious zones. His view of the city as a cultural landscape is relevant to Kharkiv as well.

Karl Schlögel in "In Space We Read Time" (2016) [11] interprets Eastern European cities as historical "maps of memory". He examines symbolic landscapes, focusing on ideological changes that influence the formation of specific districts.

In the article "Landscape change and the urbanization process in Europe", Marc Antrop [12] analyzes the transformation of cultural landscapes under urbanization, which is particularly important for understanding Kharkiv's evolution from a fortress into an urban settlement.

L. Jacques, in "La ville industrielle et ses quartiers" (2003) [13], explores the French city of Lyon as an example of a city with functionally divided quarters based on professional criteria, highlighting the role of rivers and industrial guilds.

Overall, the academic tradition of studying the residential development of Kharkiv in the 18th–19th centuries is relatively recent. However, an interdisciplinary foundation has already formed, combining urbanism, history, cartography, and social geography. The main focus is on planning features, the impact of state policy, demographic dynamics, social structure, and parallels with European cities.

Purpose and Objectives. The purpose of this study is to identify the key principles behind the formation of residential districts in Kharkiv by analyzing the factors that influenced their spatial organization throughout various historical periods. Special attention is devoted to the genesis of changes in Kharkiv's city-forming functions across different historical stages, and to the role of natural landscape and social structure as fundamental drivers that shaped the unique character of the city's private housing.

Materials and Research Methods. The study is based on an interdisciplinary approach that combines methods of historical-architectural, urban planning, cartographic, and socio-geographic analysis. Its aim was to identify the key factors behind the formation of residential districts in Kharkiv during its early stages of development, particularly during the transformation from a Cossack fortress to a Sloboda regional center. Research materials include historical maps, master plans, archival documents, statistical data, memoirs, as well as scholarly works by Ukrainian and international researchers. Particular attention is given to Kharkiv's plans from the 17th–18th centuries, which allow tracing changes in planning structure [1, 2, 5, 14, 15].

The methodology included historical-genetic, morphological, spatial, and socio-demographic analyses, which enabled an exploration of the preconditions for the formation of the urban environment, development structure, functional hierarchy of districts, and the role of social stratification. The study traces the impact of natural conditions, defensive logic, social structure, transport routes, and administrative regulation on the spatial organization of the city.

The results of the analysis made it possible to describe the main principles of spatial development, determine the influence of social, economic, and environmental factors, assess the adaptation potential of historical districts in the contemporary city, and lay the groundwork for developing strategies for the modernization and integration of Kharkiv's low-rise residential areas within the framework of modern urbanization.

Main Content. The historical development of Kharkiv unfolded as a sequence of stages, each characterized by a shift in the city-forming function and, consequently, a transformation in the spatial organization of its residential districts. An important methodological basis for the analysis is the identification of two initial periods: Kharkiv as a fortress and Kharkiv as a Sloboda (settlement) town.

This approach enables not only the tracing of urban planning evolution, but also the examination of the role of natural, social, administrative, and economic factors that influenced the formation of urban space.

In the first stage, in the mid-17th century, the city primarily fulfilled defensive, administrative, and colonization functions, which shaped the character of its development and spatial organization. Later, during the Sloboda development period, Kharkiv gradually transformed into an administrative, craft, and commercial center, and the socio-estate factor became decisive in shaping the residential environment. This analytical lens helps to reveal how the city's spatial models changed, which social groups contributed to its development, and how external factors – military, economic, and administrative – were reflected in planning structures and building typologies.

Kharkiv as a Fortress (1654–1690s). The founding of Kharkiv in the mid-17th century marks the first stage in the development of the city's residential fabric. Its establishment should be viewed in the context of the complex political, military, and social processes affecting Ukraine and the Muscovite State at that time. The conventional founding date – 1654 – symbolizes the beginning of the settlement of the southern frontier of the Muscovite State, which required enhanced protection due to the constant threat of raids by Crimean Tatars and Nogais. Kharkiv emerged as a fortified settlement inhabited by migrants from the Right-Bank Ukraine – primarily Cossacks and peasants seeking security and opportunities to cultivate new lands.

At this stage, Kharkiv primarily fulfilled military-defensive and colonization functions, and its spatial development was determined less by urban planning regulations and more by the needs for survival, protection, and self-sufficiency. The city's main formative function was defensive: a fortress on the high right bank of the Kharkiv and Lopan rivers became a key military-administrative center for controlling and defending the borderlands. Its strategic importance was reinforced by the advantageous terrain and a system of fortifications – ramparts, moats, wooden walls, and towers.

In addition to defense, the fortress also served as a center of craftsmanship, trade, and administration. Within its walls, *sluzhili liudy* (service-class people performing military or administrative duties) – cossacks, *striltsi* (armed guards or gunners with firearms), *posadski* (townspeople), and clergy – were concentrated, laying the foundations of the city's initial urban structure. The analysis of this stage makes it possible to distinguish the key factors influencing the formation of spatial organization and residential development – particularly natural-geographical, fortification-related, and social factors.

Fortification Factor. The fortification factor played a decisive role in the initial stage of Kharkiv's formation. Already in the first years after its foundation, around 1655, defensive fortifications were erected on the high right bank of the Kharkiv and Lopan rivers "according to the Cossack custom" – using earth ramparts, ditches, palisades, and wooden towers. Initially, Kharkiv functioned as a fortified settlement, where the main population resided predominantly during the winter. In warmer seasons, residents moved to farmsteads, mills, apiaries, or went to work, particularly to the Torske salt lakes, the road to which was laid in the very first year of the city's founding.

According to the book by A. F. Paramonov "Istoriia Kharkivskoho horodskoho samoupravlennia 1654–1917 rr.", which refers to the research of D. I. Bahalii, it was the presence of fortifications that defined the status of a "city" within the conditions of Slobidska Ukraine, whereas the lifestyle remained traditionally rural. As surrounding areas became settled, fortified points acquired administrative, trade, and craft significance. The logic of defensive planning is clearly visible in the reconstructed layout of the original Kharkiv fortress (Fig. 1), where it is already possible to distinguish the main directions of the city's development – corresponding to the locations of the main gates, which determined the vectors of further spatial expansion beyond the fortified zone.

Earthen fortresses with internal planning at that time were typical for most newly founded settlements of Slobozhanshchyna. In Kharkiv, the fortress was located in the center of a natural fortification created by the terrain. The main roads radiated from its gates, forming the future transport structure of the city. These roads became rays that connected the fortress with surrounding slobodas, mills, crossings, and later – with suburbs and marketplaces.

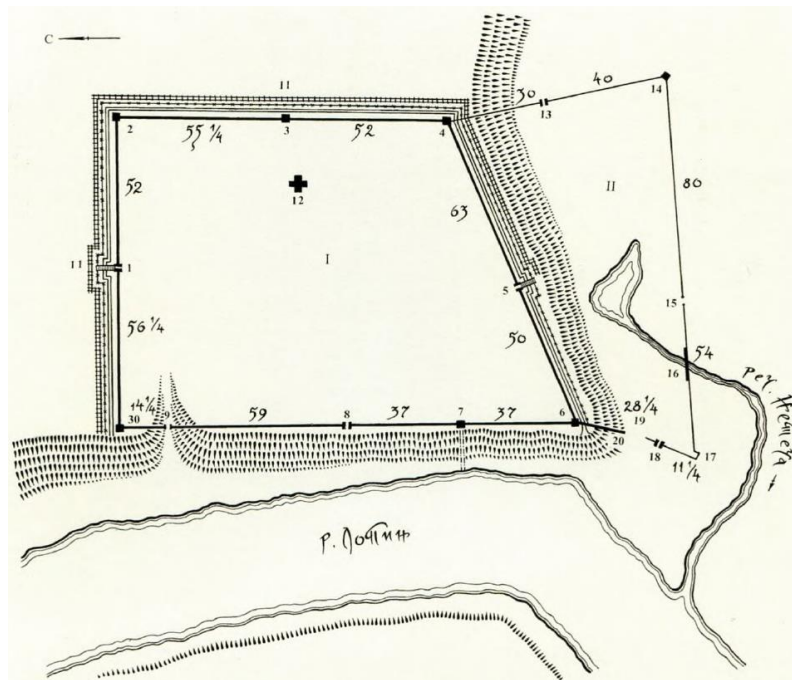


Fig. 1. Plan of the Kharkiv Fortress in the second half of the 17th century.

Reconstruction by V.M. Nedielin based on the Rozpysnyi spysok of 1668.

I. Old town. Towers: 1 – Moskovski Vorota (Moscow Gate); 2 – Nakutna Vestova (corner guard tower facing the Kharkiv River); 3 – middle corner tower; 4 – corner tower from the Kharkiv River; 5 – Chuhivska Brama (Chuhiv Gate); 6 – corner tower from the Lopan River; 7 – Taynytska; 8 – glukha from the Lopan River (blind tower); 9 – gate to the Lopan River; 10 – nakutna Verkhna Lopanska (Upper Lopan Corner Tower). Other buildings and structures: 11 – fortress moat, chastynok and nadolby (palisade sections and obstacles); 12 – wooden Uspenskyi Cathedral; II. Water Outpost: 13 – Mykilski Gate (unfinished); 14 – nakutnyi zrub (corner timber block); 15 – Troitski Gate (unbuilt); 16 – section of timber wall above the washout; 17 – diversion channel; 18 – Rizdvyana Gate (without roof or covering, and no gate constructed); 19 – unbuilt wall section; 20 – timber wall; 21 – sections and defensive logs. Distances between towers are marked in *sazhens* (old Russian fathom units)

Ramparts and moats served not only a defensive function. They marked the boundaries of residential territory and created a clear perimeter for development. In Cossack-type towns, earthen ramparts were significant not only as barriers but also as spatial compositional lines that defined the placement of public buildings – churches, squares, and gates. In the case of Kharkiv, as shown in Fig. 2, the first sacred and administrative structures were located precisely on the fortified high grounds.

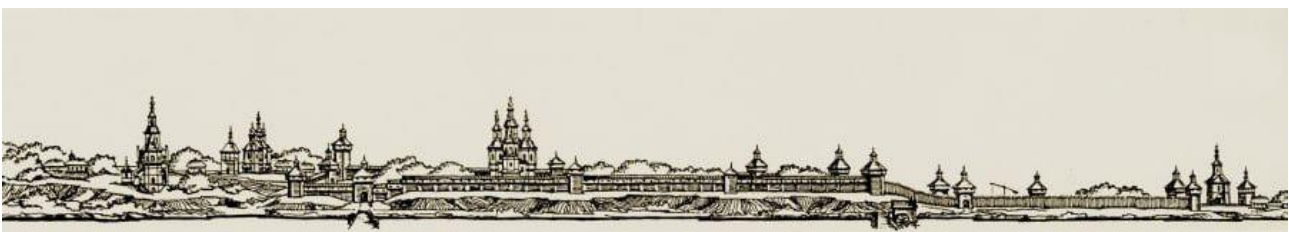


Fig. 2. Panorama of the Kharkiv Fortress. Late 17th century.

Graphic reconstruction by V.E. Novhorodov

In the 18th century, most fortifications gradually lost their military function, although their form remained inscribed into the urban structure. As evidenced by later historical sources [17–21], old ramparts and moats often became the basis for new streets or block boundaries. Thus, even after losing their defensive purpose, they continued to define the spatial logic of the city.

Therefore, the fortification factor in Kharkiv influenced not only its security but also its functional organization, compositional planning, and structural identity. It set the framework upon which subsequent urban planning decisions were layered.

Environmental and geographical factor. Natural and geographical conditions played a key role in the choice of location for the first settlement on the territory of future Kharkiv. According to contemporary researchers, particularly [5, 22], it was the natural landscape – rivers, ravines, water springs, floodplains, forested areas – that determined not only protection but also the functional parameters of the future urban space. The geographical position of Kharkiv between the Lopan and Kharkiv rivers created a natural fortification advantage. The confluence of the rivers formed a swampy floodplain, difficult to cross for cavalry, which significantly limited the possibility of a surprise attack from three directions. The fourth side – the elevation where the present-day cathedral is located – was covered with dense forest and also served as a natural shield.

This terrain provided not only defensive advantages but also directly influenced the layout of streets and blocks. In terms of urban planning, the first streets were formed according to the logic of bypassing natural obstacles, following the rivers and watersheds, which later became the basis of the radial-ray structure of Kharkiv's central part. The irregular, "organic" network of roads and buildings in Kharkiv did not arise randomly, but as a direct adaptation to the complex geography of the area.

In addition to general topography, the presence of fresh water sources played a crucial role. The availability of a spring – the so-called Bilhorodska krynytsia – is considered the initial settlement point of the area [2]. Constant access to water was vital for survival and determined the location of the first houses and homesteads. At the same time, the presence of natural surroundings contributed to the development of household activities: grazing livestock, gardening, farming, and constructing mills on the rivers.

Besides its utilitarian and defensive functions, the landscape also held symbolic significance. The highest point – the ridge between the rivers – later became a spatial dominant not only for defense but also for sacred architecture. According to tradition, churches were built on elevations, emphasizing the importance of interaction with the natural vertical of space – the line of the sky, horizon, and ridge. Thus, the natural and geographical factor acted not merely as a condition for settlement, but as a complex precondition for shaping the city's structure. It simultaneously defined its safety, functionality, planning logic, and archetypal imagery.

Social stratification factor. The city did not emerge as the result of centralized planning, but rather as a community of settlers who arrived from various parts of Left-Bank Ukraine, Kyiv region, Poltavshchyna, and the Polish-Lithuanian Commonwealth. According to contemporary researchers [22–24], these settlers typically formed not isolated khutors (homesteads), but slobodas – fortified communities with a high degree of self-governance, shared defense, and internal order.

At this early stage, the socio-estate factor had not yet become dominant, as the urban community was still in formation. Its structure was primarily composed of sluzhili liudy (service-class people performing military or administrative duties) – cossacks, striltsi (armed guards or gunners with firearms), posadski (townspeople), and, later, clergy. They occupied the territory within the fortress based on military-administrative principles rather than professional or estate-based specialization. Nonetheless, social ties were already beginning to play a role: a core urban community began to form, laying the groundwork for self-governance, mutual assistance, and collective management. The area surrounding the fortress began to be settled by small villages, which had not yet developed clear social stratification but were already setting the direction for further colonization of the territory. Thus, during this stage, the socio-estate factor played an auxiliary role, gradually reinforcing the importance of community alongside the dominant defensive function.

Accordingly, the first stage of residential district formation in Kharkiv can be characterized as a period of organic, naturally defensive development. These features laid the foundation for the city's future evolution in subsequent periods and remained embedded in the planning structure of Kharkiv's older districts – even after the radical urban transformations of the 19th–20th centuries.

Kharkiv as a Sloboda Town (1690s–1765). The late 17th to 18th centuries marked a new stage in the development of Kharkiv, as the city transitioned from its military-defensive role to that of an

administrative, economic, and social center of Slobozhanshchyna. This process is particularly evident in Fig. 3, which shows the transformation of the city panorama: public, administrative, and social buildings gradually began to replace dominant defensive structures, indicating a shift in the functional profile of the city. Over time, the city became the administrative center of the Kharkiv Sloboda Cossack Regiment and, later, the capital of the Slobidsko-Ukrainska Governorate, established in 1765. This contributed to the expansion of its influence over the surrounding territories and to the transformation of its overall urban structure.

During this period, Kharkiv's primary city-forming function became administrative-economic and trade-craft oriented. A network of slobodas – settlements – actively developed around the city and acquired specific professional or social specializations. The formation of suburbs supported the growth of craftsmanship, fair trade, interregional economic connections, as well as a steady increase in population.



Fig. 3. Panorama of the Kharkiv Fortress. Late 18th century.
Graphic reconstruction by V.E. Novhorodov

During the period of Kharkiv's development as a sloboda town (1690s–1765), the landscape played a significant role in shaping its spatial structure. As shown in Fig. 4, slobodas were typically established along the banks of rivers – Kharkiv, Lopan, and Udy – since access to water was critically important not only for everyday needs but also for crafts, milling, gardening, and agriculture. The hydrography and orography of the area determined both the choice of settlement locations and the nature of development: settlements were clustered along waterways, taking advantage of the natural protective features of river floodplains, elevated terrain, and forested areas.

Gradually, there emerged a need to "tame" water resources – by regulating riverbeds, constructing dams, bridges, and mills. These interventions not only served economic purposes but also influenced the planning of streets and urban blocks. As slobodas expanded, their built environment adapted to the terrain: community centers – churches, squares, schools – were placed on elevated ground, while residential development occupied lower areas to maintain access to water.

Landscape features also played a role in defining the boundaries between settlements, shaping the direction of transport networks and guiding the expansion of inhabited areas. Through the combination of natural factors (rivers, ravines, hills) and socio-estate structure, a mosaic spatial-functional pattern emerged in Kharkiv, in which each sloboda retained its own identity while gradually integrating into the broader urban system.

Thus, the interaction between built form and landscape during the sloboda period laid the foundation for the morphological diversity of Kharkiv, which persisted even after the introduction of regular planning in the 18th–19th centuries. As population increased and community needs evolved, the spatial-functional organization of the city became more complex, which in turn led to a more intricate planning structure. Whereas landscape factors were decisive in the early stages of settlement development, over time, socio-estate factors came to the fore, shaping not only functional zoning but also the spatial hierarchy of the urban environment. The socio-estate factor gained particular significance, directly influencing the development of residential districts. Depending on the social status of residents, specific slobodas were formed – Cossack, artisan, clerical, or commercial. This resulted in both functional and spatial differentiation of the urban environment: from street layout to building typologies, from construction materials to the organization of household plots.

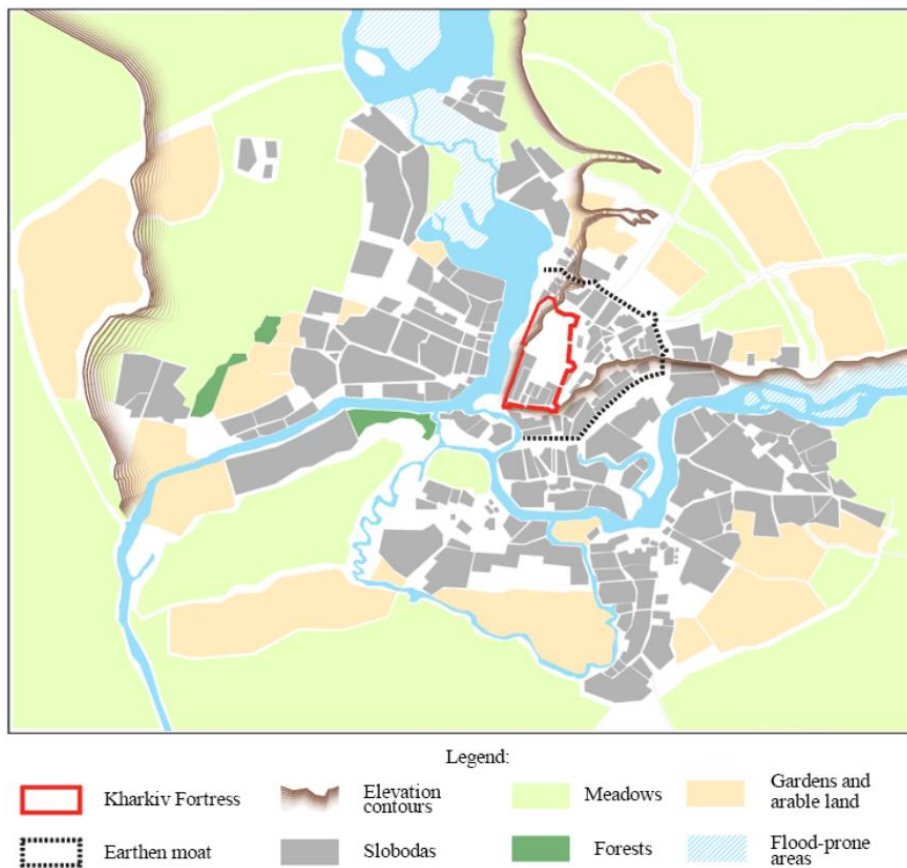


Fig. 4. Scheme of Kharkiv. Late 17th century, based on the 1742 map

Slobodas were characterized by strong social homogeneity. Often, they were formed based on occupational or estate criteria: Cossack, service-class, clerical, or artisan. This determined the functional structure of space – each community sought to establish its own church, square, well, school, and cemetery. Residents of slobodas jointly organized their living environment, made collective decisions regarding the placement of buildings, street orientation, and locations for economic activity. Such a level of autonomy was typical of Ukrainian slobodas, which operated on the basis of traditional customary norms and military discipline.

Social structure was also evident in everyday life. A typical sloboda-era homestead was not merely an individual dwelling, but a space of collective interaction: shared boundaries between yards, common gardens, service paths, and pastures. Neighborly ties were as significant as kinship relations [23, 24]. For this reason, residential areas within slobodas were not formed as isolated units, but as cohesive settlements with strong social interaction and functional interdependence.

Furthermore, social mobility during the early period was limited: most residents remained within the same sloboda for generations. This contributed to the stability of spatial structure and the continuity of building traditions. Some slobodas in Kharkiv – such as Lysogirska and Ivanivska – retained their identity in spatial layout even into the 19th century, despite administrative reforms and the city's growth.

The social factor played a crucial role not only in shaping human capital but also in forming the spatial structure of the city. During this period, the trade factor also became increasingly important: the development of fairs and commerce stimulated the emergence of new routes, which in turn influenced the formation of the street network and areas of active spatial growth.

As a result of the early stages of development, a new spatial model of Kharkiv had already taken shape by this period: the city was no longer confined to the fortified area (ostroh) but came to include the posad and surrounding slobodas, where the majority of the urban population resided. From the earliest years of Kharkiv's existence, its inhabitants began to establish khutors and pasiky (beekeeping farms) around the fortress, engaging in agricultural and household activities. These plots

of land – gardens, apiaries, and homestead allotments – surrounded the city, forming the first suburban structures of spatial settlement.

Part of the population lived permanently in slobodas and khutors located outside the fortified zone, which over time transformed into new urban districts. This gave rise to a territorial structure in which the fortified core functioned as the nucleus, around which the districts of Podil, Zalopanska, and Zakharkivska evolved. These areas would later receive official status as city districts, although in the early stages they functioned as posad-type suburbs (Fig. 5). The diagram also shows the main directions of the city’s development, which corresponded to the key transportation rays extending from the central fortress. Settlement expansion occurred without strict regularization, guided instead by the practical needs of the population, natural conditions, and economic feasibility.

By the second half of the 17th century, Kharkiv’s territorial structure had already begun to form as polycentric – comprising multiple local centers of habitation and economic activity, which were gradually integrated into the city’s urban fabric.

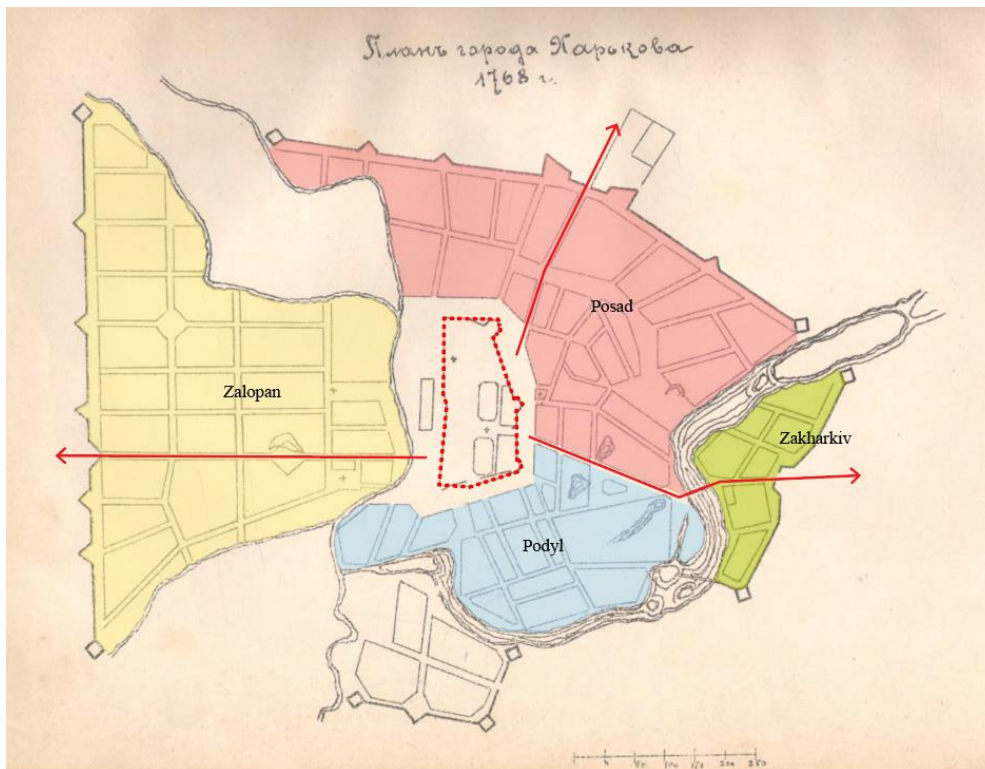


Fig. 5. Diagram of the formed districts of Kharkiv based on the 1768 city plan

Conclusions. The study found that the formation of residential districts in Kharkiv throughout the 17th–18th centuries was a multi-layered process influenced by a combination of natural landscape conditions, socio-estate structure, changes in the administrative status of the city, and the development of infrastructure networks. The spatial organization of Kharkiv did not emerge instantaneously but was formed through the gradual layering of functional structures onto the original sloboda environment, creating morphological complexity and diversity.

The first stage, associated with the city’s foundation as a fortress, laid down the spatial framework and key development vectors aligned with the natural topography and defensive needs. The second stage – the formation of Kharkiv as a sloboda-type settlement – reinforced a polycentric settlement model, where the fortified core coexisted with peripheral suburbs (slobodas) that had professional or estate-based specialization. It was during this period that the crystallization of the urban structure took place, with defined directions of expansion and the emergence of transport-functional axes that remained embedded in the city’s layout.

Landscape features and social stratification factors determined the structure of the slobodas as spatially and socially distinct, yet interconnected, entities that were gradually integrated into the

overall urban fabric. The organic combination of regular and irregular planning, characteristic of Kharkiv, is the result of this transformation: the regular grid of imperial-era quarters coexists with historical fragments of the earlier sloboda development.

Thus, Kharkiv presents a unique example of phased urban structure formation, where the historical residential districts of the sloboda type are not archaic remnants but a structural resource for contemporary development. Understanding these processes makes it possible to address the integration of established residential areas into modernization strategies, ensuring the continuity of spatial heritage, environmental cohesion, and the social resilience of the city amid ongoing urban transformations.

References

- [1] Tsentral'nyi derzhavnyi istorychnyi arkhiv Ukrainy v m. Kharkovi, Arkhivni kartohrafichni materialy XVII–XVIII st., rukopysni karti z fondiv arkhivu.
- [2] D. I. Bahalii and D. P. Miller, *Istoriia mista Kharkova za 250 rokiv yoho isnuvannia (1655–1905)*, vol. 1–2, Kyiv: Kupola, 2004.
- [3] D. I. Bahalii, "Materialy dlia istorii kolonizatsii i byta Kharkovskoi i otchasti Kurskoi i Voronezhskoi hub", *Sbornyk Kharkovskoho Ystoryko-Fylolohycheskoho Obshchestva*, Kharkiv: Typ. K. P. Schasny, 1890, tom. 2, pt. 1, 433 p.
- [4] D. I. Bahalii, *Istoriia Slobids'koi Ukrainy*, Kharkiv: Osnova, 1991.
- [5] A. F. Paramonov, *Karty i plany horoda Kharkova XVIII–XX vv.*, Kharkiv: Folio, 2020.
- [6] L. V. Kachemtseva, "Stanovlennia arkhitekturno-proiektnoi spravy v mistakh Slobids'koi Ukrainy (druha polovyna XVIII – pochatok XX st.)", dis. ... kand. arkhitektury: 18.00.01, Kharkivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva ta arkhitektury. Kharkiv, 2007.
- [7] V. V. Vechers'kyi, "Arkhitekturna i mistobudivna spadshchyna doby Hetmanshchyny: formuvannia, doslidzhennia, okhorona", Kyiv: NDITIAM, 2001, 349 p.
- [8] V. V. Vechers'kyi, *Vtracheni ob'iekty kulturnoi spadshchyny Ukrainy*, Kyiv: NDITIAM, 2002.
- [9] L. Mumford, *The City in History: Its Origins, Its Transformations, and Its Prospects*, New York: Harcourt, 1961.
- [10] M. Roncayolo, *La Ville et ses territoires*, Paris: Gallimard, 1990.
- [11] K. Schloegel, *In Space We Read Time: On the History of Civilization and Geopolitics*, New York: Bard Graduate Center, 2016.
- [12] M. Antrop, "Landscape change and the urbanization process in Europe", *Landscape and Urban Planning*, vol. 67, pp. 9–26, 2004.
- [13] L. Jacques, *La ville industrielle et ses quartiers: formes urbaines, identités sociales*, Paris: L'Harmattan, 2003.
- [14] V. O. Pirko, *Opysy Kharkivs'koho namisnytstva kintsia XVIII st.*, Kyiv: Naukova dumka, 1991.
- [15] *Kharkovskaia huberniia. Spisok naseleennykh mest po svedeniiam 1864 hoda*, SPb: Tsentr. statist. Komitet Min-va vnutr. del, 1864.
- [16] A. L. Antonov, V. L. Masliichuk, and A. F. Paramonov, *Istoriia Kharkivs'koho miskoho samovriaduvannia (1654–1917 rr.)*, Kharkiv: Rehion-inform, 2004.
- [17] A. Yu. Leibfreid and Yu. Yu. Poliakova, *Kharkov. Ot kreposti do stolitsy*, Kharkiv: Folio, 2001.
- [18] O. A. Yatsyna and H. M. Mykhailov, *Persha Kharkivska fortetsia*, Kharkiv: Dim reklamy, 2021.
- [19] O. Yu. Biriova, "Kharkivshchyna – istorychna ukrains'ka zemlia", *Hrani*, vol. 25, no. 5, pp. 27–30, 2022.
- [20] O. Yu. Biriova, "Natsional'nyi sklad naseleennia slobids'koho rehionu v XVII – XIX st.", *Hileia: naukovyi visnyk. Istorychni nauky*, no. 150, pp. 24–27, 2019.
- [21] E. O. Albovskiy, *Istoriia Kharkivs'koho slobids'koho kozats'koho polku (1651–1765 rr.)*, Kharkiv: Typ. Hub. Pravlinnia, 1895.
- [22] V. L. Masliichuk and H. H. Yefimenko, *Slobids'ka Ukraina ta formuvannia ukrains'ko-rosiiskoho kordonu*, Kyiv, 2017.

- [23] I. I. Sreznevs'kyi, *Istorychne obozrinnia hromads'koho ustoiu Slobids'koi Ukrainy vid chasu yii zaselennia do perebudovy v Kharkivsku huberniiu*. Kharkiv: Typ. okruzh. shtaba, 1883.
- [24] M. F. Sumtsov, *Slobozhane: istoryko-etnohrafichna rozvidka*, Kharkiv: Soiuz, 1918.

ФАКТОРИ ФОРМУВАННЯ ЖИТЛОВИХ РАЙОНІВ У ХАРКОВІ: ІСТОРИКО-ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ XVII- XVIII СТ.

¹Зібров З.К., аспірант,
zakhar.zibrov@kname.edu.ua, ORCID: 0009-0002-4841-7852

¹Кудряшова І.В., к.т.н., доцент,
iryna.kudryashova@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3593-313X

¹Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Черноглазівська, 17, Харків, 61002, Україна

Анотація. У статті проведено історико-просторовий аналіз формування житлових районів Харкова, зосереджений на перших етапах становлення міста. Розглянуто два періоди: заснування Харкова як козацької фортеці та розвиток як слобідського міста. Дослідження не претендує на висвітлення всіх ключових етапів історії Харкова, а саме акцентує увагу на початкових фазах формування міського середовища.

Проаналізовано вплив природно-географічних умов, фортифікаційної логіки, соціальної структури населення, розвитку адміністративного регламентування та міжміських зв'язків на просторову організацію Харкова. Особлива увага приділена процесам просторової стратифікації, що проявлялися у розшаруванні міського середовища за соціальною, функціональною та морфологічною ознаками. В умовах трансформації слобод від напівавтономних поселень до інтегрованих частин міста формувалася складна мозаїчна морфологія Харкова: регулярна сітка кварталів міста нашаровувалася на органічну структуру слобід, створюючи контрастну картину просторової організації. В другій половині XVIII століття це призвело до формування ієрархії міських просторів, де центри з репрезентативною забудовою співіснували з периферійними районами, що зберігали риси традиційної слобідської забудови. Таке нашарування структур забезпечило специфічну морфологічну композицію міста, яка стала основою його подальшого розвитку.

Результати дослідження можуть стати підґрунтям для розробки концепцій модернізації та інтеграції сформованих історично житлових малоповерхових районів Харкова в умових сучасної урбанізації. Вони можуть бути корисними для архітекторів, урбаністів і планувальників, що займаються питаннями розвитку міських територій, оновлення інфраструктури, формування комфортного житлового середовища та пошуку збалансованих рішень між збереженням просторової структури і потребами сучасного міста.

Ключові слова: житлові райони, історичне місто, історико-просторовий аналіз, містобудівна структура, соціальна стратифікація, морфологія міста, органічне планування, Слобожанщина, слобода.

Стаття надійшла до редакції 18.05.2025

Стаття прийнята до друку 6.06.2025

Дата публікації статті 24.09.2025

[This work by](#) © 2025 by [Zibrov Z.K., Kudriashova I.V.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

**COVERAGE FEATURES OF THE MULTIFUNCTIONAL PUBLIC BUILDINGS
FORMATION PROBLEMS IN DOMESTIC SCIENTIFIC SOURCES: COMMUNICATION
AND FUNCTIONAL ASPECTS**

Opryshko R.A., postgraduate,
roman.a.opryshko@lpnu.ua, ORCID: 0009-0005-4239-1606
Lviv Polytechnic National University
12, S. Bandera St., Lviv, 79000, Ukraine

Abstract. The subject of multifunctional public buildings has been extensively explored within the field of domestic science. A wide range of works have been dedicated to this subject, including abstracts presented at scientific conferences, research conducted for dissertations, and monographs. The material that has been accumulated thus far makes it possible to speak of the existence of a certain school of thought on the multifunctionality of public structures. Its primary characteristics are a combination of communicative and functional aspects that dialectically connect this issue with the tradition of modernism, and on the other hand, with the peculiarities of the information age. This specificity should be considered a strong point of the national discourse on multifunctionality, and its further practical continuation may lead to positive results.

The distinction between communicative and functional aspects is not exclusive for the purposes of this article, as they often exist not only in close interaction with each other, but also in the context of a more complex system of design situations and solutions that are associated with different scales of coverage (the level of the individual, building or urban fabric), as well as with certain priorities of providing space with symbolic and supra-functional qualities. The latter are related to the concepts of lifestyle and positioning oneself in a positive life situation by those who are direct participants in the space – involved in it both intentionally and accidentally.

These three areas are equally integrated into both the communicative and functional concepts of multifunctionality of public buildings and together create a complex structure of the subject area of theoretical coverage of this topic. The proposed system of knowledge distribution, however, is not only an intellectual reflection, but also the basis for creating a set of practical recommendations for further improving design practices, as well as creating our own identity of multifunctionality in architecture.

The novelty of the material presented in the article is related to the fact that the future development of design thinking in the field of multifunctionality of buildings and spaces is predictably associated with the search and development of various formats for combining and interacting with communicativeness and functionality, as well as expanding their semantic and technological content.

Keywords: architecture, multifunctionality, design, communication, functionality, harmonization, digitalization, optimization, public spaces.

Introduction. The formation of multifunctional public buildings and places of stay is a design field that is constantly evolving due to the great variability of the initial conditions, as well as the significant progress of various technologies that are designed to expand the possibilities of interpersonal interaction. In addition, during the late XX and early XXI centuries, the functionalist design paradigm, which was based on a clear separation of processes and purposes, was changing [1]. In this regard, the very meaning of "multifunctionality" has undergone a semantic transformation. In modernist architecture, it could be understood as a set of different functional spaces that exist together or close to each other. In post-industrial architecture, it is rather a single space in which different functions are performed. Because of this, attention is shifting from interconnection to synthesis and from designing optimal interlacement to synergy.

The analysis of the domestic theoretical material available in scientific works of various volumes makes it possible to speak about the existence of a certain model of perception of

multifunctionality, which, however, is not outlined as such and exists in the form of scattered studies that focus on certain aspects of the problem. Nevertheless, the structure of knowledge presented in them makes it possible to speak about the existence of a certain regularity of contents related to the solution of two meta-tasks, one of which is communicative in nature and the other is functional. The imposition of these meta-tasks on practical project tasks (harmonisation, optimisation, media and digitalisation) makes it possible to talk about a comprehensive system of knowledge that has been formed in the national scientific discourse on spatial multifunctionality.

Analysis of sources and publications. Given the relative prevalence of the topic of multifunctionality, this paper considers only a part of the research, which, nevertheless, gives an idea of the nature of the coverage of the topic in the national theory of architecture. In addition, many important works consider the multifunctionality of public buildings in the context of related issues, but still contain a lot of valuable data related to interaction in mixed-use environments. For example, the monograph by M. Votinov and O. Smirnov "Innovative methods of forming interactive buildings and structures in the urban environment" [2] considers the categories of variability and transformativity, which are associated with the ambiguity of functional purpose or the acquisition of such through their introduction. Studies by E. Chaban and N. Kryvoruchko [3], R. Halysych and S. Linda [4], and R. Frankiv [5] are also of a similar nature. In these and other similar works, we can note the authors' attempts to trace the changes in the multifunctional nature in accordance with the development of modern interaction technologies. This category of works has a conditionally "progressive" character and is aimed at a project-based interpretation of innovations as the main tool for creating an environment.

The other group includes studies that focus on the adaptation of rich functionality into an existing historical or other valuable context. Here we can mention the works of N. Netuzhylova [6], A. Matskoha [7], D. Popovych [8], N. Dmytryk and E. Bogomolov [9], V. Urenov [10]. Although not all of these works are directly related to subject multifunctionality, they give an idea of the nature of the challenges and opportunities associated with integration into the existing environment or its reinterpretation.

One of the most popular areas for understanding the multifunctionality of public and other buildings is the spaces of residential complexes. This issue is addressed in the articles by V. Yakubovsky and I. Parakuda [11], A. Teplova and S. Buravchenko [12], R. Kovalev, D. Ovcharenko and A. Glushchenko [13]. Many works are devoted to the field of functionality within a certain typological group, for example, sports [14], sports and recreation [15], educational [16], commercial [17], recreational [18], transport [19, 20], and spaces of complex interaction [21]. In addition to these typologically limited areas, it is also worth noting the articles in which the problem of multifunctional public spaces is considered at the level of a broader generalisation [22-24].

The purpose of the article is to structure the experience of scientific study of the topic of multifunctional public spaces and buildings in domestic sources, to outline the identity of the existing experience and to formulate the main positive features that should be further developed both at the theoretical and practical levels.

Research objectives. The objectives of the study can be divided into the following parts: a) to systematise and summarise the material accumulated in the national science concerning multifunctional spatiality, primarily in living environments; b) to outline the dialectic of communicativeness and functionality as a key feature of the national discourse on this topic; c) to identify promising areas for further development of the synthesis of these two components based on the instrumentalisation mechanisms identified, namely harmonisation, optimisation, media and digitalisation; d) to analyse the Identify possible ways to develop a comprehensive model of designing multifunctional public space in the context of a post-industrial social model of interaction, as well as a system of evaluation techniques that would allow to determine the effectiveness of the implementation of multifunctional environments. To form the basis for a possible interdisciplinary approach to the design of such spaces.

The materials and methodology of the study focus on a multi-stage consideration of textual and, to a lesser extent, empirical materials that accompany them within the framework of traditional

methods of comparative and discourse analysis. In addition, in view of the specifics of this topic, the author has developed a method of functional and communicative selection, which allows to distinguish two fundamental aspects in the body of theoretical knowledge related to practical physical presence and activity, as well as the conditionally metaphysical side of being in the space of diverse choices and interaction. To obtain the results, the method of dialectical synthesis was also used, which allows to provide a reasonable answer to the tasks set and to formulate further promising areas of research.

Summary of the main material. The subject of multifunctionality, having a significant scientific literature, is, however, in constant search of new conceptualisations due to the dynamic development of various types of interaction. The main ones are: a) implementation of the principles of universal design, which addresses the problems of equal accessibility and inclusiveness [25]; b) integration of media and digital technologies; c) expansion of the repertoire of spatial content and choice. These three programme needs form the demand for specific design solutions and are, to some extent, universal, most likely due to the departure from the functionalist design paradigm inherent in the modernist design culture of the industrial era [26]. It is being replaced by a post-industrial design culture based on greater pluralism, the absence of mandatory canons of form-making, and individual subjectivity. In this sense, it can be said that most of the works that consider the concept of "multifunctionality" do so, though often not consciously, in a different manner than that contained in the immediate etymological meaning of the concept. This is due to the fact that the very concept of "functionality" is undergoing universalisation and changes in its meaning. In many cases, it is a jointly operated space that allows for many processes – functions – rather than many separate functional areas placed around each other and gathered in one place.

The analysed sources also clearly demonstrate the understanding that such spaces do not have the communicative qualities that are of primary importance for multifunctionality in the post-industrial sense of the word. Rather, they are spatial containers in which the possibility of permanent adaptation and diversification of interaction practices is constructed.

At first glance, such a theoretical construction describing the nature of multifunctionality transformation may seem simple, but it leads to a large number of completely new tasks that require theoretical and experimental study. Combining the principles of inclusiveness, media and diversity is a constructively creative task that requires new tools, especially in conditions where a certain part of the functions of creating the environment can be performed by users themselves [27].

In the works of domestic authors, the intuition of communicativeness is associated with various ways of semantic and visual-affective interaction aimed at informing about the content and nature of the environment, taking into account the spatial experiences that they can currently provide. For example, multifunctionality associated with living environments implies not only a purely pragmatic distribution of zones intended to meet domestic needs and life support processes, but is aimed at creating environments of a wide range of choices, which include, for example, such practices as sports, leisure, cognition, neighbourly communication, inspiration, etc. To a certain extent, it can be said that multifunctionality within public buildings related to housing is moving towards a constant universalisation of choice so that the public function becomes a state of permanent presence with a simultaneous increase in activity opportunities.

In this context, it is worth focusing on the question of what communicability in multifunctional space actually is and what are the criteria that determine its effectiveness. According to the results of some studies, for example, by D. Popovych [8], it is closely related to the design methodology of multidimensional parametric design, the formative basis of which is often bionicity and the study of natural morphogenesis. This formal language is a kind of manifestation that separates the architectural environment from modernist-functionalist stereotypes and binds it to the vision of a kind of spatial alternative that is associated with multifunctionality in the post-industrial sense of the word (as discussed above). For example, the architectural and design interpretation of a garden or oasis itself creates a functionally non-deterministic space within which various behavioural scenarios can unfold [22].

The resulting spatial framework can be further filled with all three programme needs without

the need for a radical change in the concept of experience, which is focused on certain archetypes of perception. It is on this basis that the new division of the design worldview related to multifunctionality into harmonisation, optimisation and media and digitalisation is taking place. Each of these areas is part of a comprehensive programme to create a universal multifunctional space that requires a new theoretical definition.

As mentioned above, the content of the concept of "multifunctionality" has changed in the post-industrial era due to the departure from the division into functions and missions inherent in the industrial era, which often had the character of static or monotonous repetition. Criticism of modernism, in its time, also included a break with existential immobility, which was to be replaced by complexity and contradiction, on the basis of which numerous postmodern experiments and criticism of postmodernism itself took place [28].

If we further consider the example of creating a multifunctional space based on nature-morphic analogues (man-made groves, oases, etc.), we can argue that such a formative model operates with archetypal harmonising tools - allusions to some ideal nature or paradise metaphor that is inherent in different historical periods of architectural development [29]. In terms of optimisation and mediation, various techniques can be used, depending on the state of technological development and the nature of the variability of the processes being carried out. Because of this, the question of a new definition of the theoretical interpretation of "diversity" may take the form of determinism by an infinite number of choices. Although, in the sense of practical architecture, such an ideal theoretical construct is impossible, it does provide an understanding of the difference that the concept has undergone since the transition to the post-industrial era.

With this theoretical framework in mind, we can say that the national scientific discourse has formed an understanding that multifunctionality and the public, to a certain extent, have become relatively related concepts that, although different in their etymological content, often become interchangeable at the level of architectural practice.

The notion of "public" (in the spatial sense) implies communicative interaction, which is determined by a certain function, but, as shown above, the existence of such a function is gradually supplemented by others, thus the environment is moving towards the theoretical ideal, which is a space of unlimited choice. The latter refers not only to activities or processes, but also to the exchange of information and impressions. This gradually blurs the line not only between the concepts of "multifunctionality" and "public", but also "function" and "perception".

In the context of the above analysis of the national scientific achievements in the field of multifunctional public buildings and spaces, it is worth talking about a situation in which a system of dialectics of communicativeness and functionality has developed, which are determined by different theoretical ideals of multifunctionality in the architecture of the post-industrial era, as an environment of unlimited choice. In this conditional, hypothetical point, public activity can take on a variety of forms, and the conceptual content of the environment itself is universal. Therefore, it is no longer possible to talk about a specific purpose of this kind of object, since any processes and functions can take place in it.

If we take the theoretical construct of ideality described above with conditional 100 units of measurement, and its opposite - the absence of any choice with conditional 0 units of measurement, we will get a scale of multifunctionality efficiency, which in the future can be used to assess the quality of certain architectural solutions. It is likely that the increase in choice will be due to the introduction of augmented reality technologies, as well as the expansion of cognitive perception, including through the introduction of artificial intelligence and neurotechnologies [30]. The nature and parameters of such multifunctionality are currently difficult to predict, but it is likely that it will not involve the elimination of all previous spatial experiences, as they underlie the current identity and effectively link spatial elements with the necessary semantic associations.

Nevertheless, the nature of the design algorithm formed by the dialectic of communicativeness and functionality will be preserved, and its implementation based on three directions – harmonisation, optimisation, media and digitalisation – will probably remain as the basic operational structure of design activities in the field of multifunctional spaces. Instead, the

three programme needs (inclusiveness, media and diversity) will be fully realised in the sense they are currently understood.

An important feature of the national discourse that is worth noting is its practical focus on solving applied problems that are related to the existence of an existing reality created by historically formed architectural objects that cannot be eliminated both from the point of view of monument protection legislation and for economic and legal reasons. Therefore, the question arises of a new interpretation of this structure in terms of making it multifunctional in the post-industrial sense. This task, which requires a separate study, cannot, however, be considered to be in significant conflict with the trends described above. Numerous examples of the adaptation of valuable cultural heritage sites as spatial frameworks for complex public functions show that existing material structures can be used to achieve the desired result, which are given a broader semantic and associative load. The creation of coworking spaces, creative spaces, service centres, etc. in historic buildings or established landscape areas expands the potential of individual spatial experiences, giving them the features of exclusivity and uniqueness.

At the same time, in the national discourse and practice, there is a certain tendency to exclusivise and "elitise" multifunctionality, which becomes an element of limited accessibility only for a small privileged group. This is mainly due to the high cost of services or spatial segregation, including the emergence of spatially separated spaces of limited accessibility [31].

The solution to this problem should be considered one of the promising areas for further study of the multifunctionality of public buildings and understanding them as a place of dialogue and solidarity for different groups of people, regardless of their property, age or other status. In addition, public spaces may also be redefined by the growth of the individual delivery sector, services provided at home through online platforms, and various forms of activities that can be carried out using immersive presence technologies. Therefore, the motivation and subject-spatial component of the public environment is likely to change and new functional demands will emerge that will determine the multifunctionality of this kind of environment. For example, libraries as a place of active presence will be transformed into centres where existing and new collections will be digitised, and readers will be able to access them online at home. On the other hand, active leisure centres, such as swimming pools, will experience a diversification of choices, which will further increase their attendance.

In this regard, new challenges and tasks are likely to arise for designers and developers, who will have to understand the multifunctionality of public spaces as a phenomenon that takes place not only in physically separate areas, but also partially outside them in environments created by multimedia intermediaries and immersive structures.

Given the above analysis, we can also briefly outline a potential theoretical model for the formation of multifunctional public buildings and spaces, which, presumably, consists in the construction of a communicative-functional synthesis based on the study of the nature of the main request (sports, transport, entertainment, etc.), which is complemented by the expansion of choice. Thus, a conceptual framework is formed, which is implemented through the simultaneous combination of three directions: a) harmonisation (related to the problem of combining different stylistic, chronological, semiotic elements into a single aesthetic whole); b) optimisation (related to the search for ways to find the best balance of costs and benefits at different stages of the implementation of multifunctional objects) and c) media and digitalisation (related to the introduction of changing visual elements with an information load - entertainment, advertising, informational, etc.) In modern conditions, but not in general, the totality of these mechanisms of constructing multifunctionality receives its positive social reception through: a) the introduction of universal design principles, which addresses the problems of equal accessibility and inclusiveness; b) the integration of media and digital technologies; c) the expansion of the repertoire of spatial content and choice.

Conclusions:

1. The article outlines three programmatic needs that can be traced in the national discourse around the multifunctionality of public buildings, namely: a) implementation of the principles of

universal design, which addresses the problems of equal accessibility and inclusiveness; b) integration of media and digital technologies; c) expansion of the repertoire of spatial content and choice. The successful or unsuccessful meeting of these needs affects social reception.

2. It is determined that the conceptual basis for the formation of multifunctional buildings and spaces is the synthesis of communicativeness and functionality, which are carried out in the context of rethinking the concepts of "multifunctionality" and "public", which tend to a conditional theoretical ideal - a space of universal choice. This conceptual framework is implemented through a combination of three areas: a) harmonisation (related to the problem of combining different stylistic, chronological, semiotic elements into a single aesthetic whole); b) optimisation (related to the search for ways to find the best balance of costs and benefits at different stages of the implementation of multifunctional objects) and c) media and digitalisation (related to the introduction of changing visual elements with an information load – entertainment, advertising, informational, etc.)

References

- [1] L.E. Carranza, *Functionalism and social progress. In Radical Functionalism*. Routledge, 2021.
- [2] M.A. Votinov, O.V. Smirnova, *Innovatsiini pryomy formuvannia interaktyvnykh budivel i sporud u miskomu seredovyshchi*. KhNUMH im. O. M. Beketova, 2019.
- [3] E. Chaban, & N. Kryvoruchko, "Methodology of integration of digital technologies into the interior design of modern urban spaces", *Ukrainian Art Discourse*, (6), pp. 197-207, 2024.
- [4] R.Ya. Galishych, O.B. Linda, "Modern experience in designing art centers", *Urban Planning and Territorial Planning*, (51), 2014, pp. 51-56.
- [5] R. Frankiv, "Transformation of ideas about architectural form in the context of the development of the meta-universal environment", *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*, 4(2), pp. 192–197, 2022.
- [6] N.V. Netuzhylova, "Experience of re-adapting industrial areas in Western European countries (using the example of Great Britain) for multifunctional public complexes", *Urban Planning and Territorial Planning*, (41), pp. 286-291, 2011.
- [7] A.S. Matsyokha, "Formation of national identity in public spaces of buffer zones of cultural heritage sites of Ukraine by means of landscape architecture", *Modern Problems of Architecture and Urban Planning*, (67), pp. 144-156, 2023.
- [8] D. Popovych, "Comparison of the features of harmonization of volumetric and spatial architecture of modern public and residential buildings in historical urban development", *Modern Problems of Architecture and Urban Planning*, (66), pp. 214-226, 2023.
- [9] N.O. Dmytrik, O.E. Bogomolov, "Principles of functional and planning organization of the multifunctional complexes", *Regional problems of architecture and urban planning: collection of scientific works*, no. 16, pp. 70-76, 2022.
- [10] V.P. Urenev, N.O. Dmytrik, "Assessment of the factors of influence on the formation of multifunctional complexes under conditions of renovation of industrial facilities", *Advances in Civil and Architectural Engineering*, ACAE, vol. 13, Issue no. 25, pp. 14-23, 2022.
- [11] V.B. Yakubovsky, I.V. Parakuda, "Multifunctional public space in a residential environment", *Urban Planning and Territorial Planning*, (50), pp. 793-800, 2013.
- [12] A. Teplova, S. Buravchenko, "Experience in the formation of multifunctional residential complexes", *Architectural Bulletin of the Ukrainian National Academy of Sciences*, (24-25), pp. 149-156, 2022.
- [13] R.M. Kovalev, D.O. Ovcharenko, A.I. Glushchenko, "Approaches to the formation of multifunctional residential complexes", *The 11 th International scientific and practical conference "Global science: prospects and innovations"*. Cognum Publishing House, Liverpool, United Kingdom, 2024, pp. 295.
- [14] V.O. Zhornyak, "Innovative approaches to the design of sports and gaming spaces: integration of digital technologies and modular solutions", *Ukrainian Art History*

- Discourse*, (4), pp. 73-81, 2024.
- [15] Yu. Veligotska, N. Malik, "Features of the formation of modern open spaces of children's health care institutions", *Urban planning and territorial planning*, (85), pp. 50-58, 2024.
- [16] O. Shmelyova, T. Gavryleva, A. Balkarey, A. Potapenko, "Features of the application of the principles of flexible space in the interior design of a public lecture hall", *Current problems of modern design: IV International Scientific and Practical Conference*. Kyiv National University of Technologies and Design, 2022, pp. 239-242.
- [17] O.V. Berezko, "Advantages and disadvantages of the pier as a city building on the example of Kyiv", *Bulletin of the Pridneprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture*, (5), pp. 66-73, 2015.
- [18] S.S. Bronnikova, "Modern trends in the formation of recreational spaces in multifunctional public complexes", *Architecture of Buildings and Structures*, (14-15), pp. 541-547, 2018.
- [19] V. Timokhin, V. Shchurova, M. Garbar, "Qualitative indicators of open public spaces of transport interchanges", *Urban planning and territorial planning*, (86), pp. 208-220, 2024.
- [20] S.S. Kelba, "Architectural and planning organization of entrance complexes", *Modern problems of architecture and urban planning*, (29), pp. 390-399, 2012.
- [21] O.E. Shmelyova, O.O. Safronova, T.V. Bulgakova, M.O. Synytska, "Features of the design of modern coworking spaces depending on their functional purpose", *Art and design*, (4), pp. 119-131, 2019.
- [22] L.Yu. Dyachenko, O.S. Dyachenko, M.M. Mehed, V.V. Petrov, "Proposals for solutions for the development of projects of energy-efficient underground multifunctional complexes and public buildings in Ukraine", *Bulletin of the Pridneprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture*, (1), pp. 43-48, 2020.
- [23] O.A. Koval, "Modern public centers - multifunctional complexes", *Current problems of the development of restaurant, hotel and tourism business in the context of global integration: achievements and prospects*. Abstracts of the reports of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 50th anniversary of the founding of the Kharkiv State University of Food and Trade and the 10th anniversary of the introduction of the specialty "Hotel and Restaurant Business" in Ukraine, 2018, pp. 33-39.
- [24] V.S. Shmukler, O.M. Dudka, "Modern trends in architectural design of multifunctional public complexes", *Urban planning and territorial planning*, (63), pp. 515-521, 2017.
- [25] R. Frankiv, "European principles of universal design and their application in the architecture of Ukrainian cities", *Modern construction and architecture*, (9), pp. 41-47, 2024.
- [26] L. Menga, "Industrial Revolution and the birth of modern architecture", *International Scientific Journal Vision*, 7(1), pp. 105-123, 2022.
- [27] M. Calvo, R. Galabo, V. Owen, L. Cruickshank, R. Sara, *Strategies and tactics of participatory architecture*, in D. Lockton, S. Lenzi, P. Hekkert, A. Oak, J. Sádaba, P. (eds.) Lloyd, DRS2022: Bilbao, Spain, 2022.
- [28] J. Ochshorn, "Critiquing complexity and contradiction in Architecture", *Agathón| International Journal of Architecture, Art and Design*, (16), pp. 108-117, 2024.
- [29] R. Frankiv, "Ways of representing the perfect being in architectural and design objects in the context of the interaction of the present and the space of presence", *Modern construction and architecture*, (11), pp. 14-21, 2025.
- [30] U. Chaudhary, *Expanding Human Capabilities with Neurotechnology: Neuroprosthetics, BCIs, and Emerging Innovations. In Expanding Senses using Neurotechnology: Volume 2—Brain Computer Interfaces and their Applications*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2025.
- [31] B. Cherkes, Y. Idak, R. Frankiv, "The concept of 'gated community' and its explication in the theory and practice of urban planning: A literature review", *Architectural studies*, 9(2), pp.47-57, 2023.

ОСОБЛИВОСТІ ВИСВІТЛЕННЯ ПРОБЛЕМ ФОРМУВАННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ГРОМАДСЬКИХ БУДІВЕЛЬ У ВІТЧИЗНЯНИХ НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛАХ: КОМУНІКАТИВНІ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ АСПЕКТИ

Опришко Р.А., аспірант,
roman.a.opryshko@lpnu.ua, ORCID: 0009-0005-4239-1606
Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79000, Україна

Анотація. Тематика багатофункціональних громадських будівель досить широко висвітлена у вітчизняній науці. Їй присвячено роботи різного рівня від тез на наукових конференціях до дисертаційних досліджень та монографій. Накопичений, таким чином, матеріал, дає можливість говорити про наявність певної власної школи трактування проблематики багатофункціональності громадських структур. Її основними рисами є поєднання комунікативних та функціональних аспектів, котрі діалектично пов'язують дану проблематику одночасно з традицією модернізму, а з іншого боку з особливостями інформаційної доби. Цю специфіку варто вважати сильною стороною вітчизняного дискурсу довкола проблематики багатофункціональності, подальше практичне продовження якого може привести до позитивних результатів.

Розмежування на комунікативні та функціональні аспекти, однак, не є виключними у рамках даної статті, оскільки вони часто існують не лише у тісній взаємодії між собою, але також в контексті більш складної системи проектних ситуацій та рішень, котрі пов'язані з різними масштабами охоплення (рівень людини, будівлі або міської тканини), а також – тими чи іншими пріоритетами надання простору символічних та понад-функціональних якостей. Останні пов'язані з поняттями стилю життя та позиціонуванню себе в позитивній життєвій ситуації тими хто є безпосередніми учасниками простору – задіяними в ньому як навмисно так і випадково.

В зв'язку із цим опрацьована сукупність матеріалів, котрі стосуються громадської просторової багатофункціональності, поділені на такі напрямки: а) гармонізаційний (пов'язаний з проблематикою поєднання різних стильових, хронологічних, семіотичних елементів у єдину естетичну цілість); б) оптимізаційний (пошуки шляхів знаходження найкращого балансу витрат та прибутків на різних стадіях здійснення багатофункціональних об'єктів); в) медійно-цифровізаційний (пов'язаний з впровадженням у простори спільних дій та спільної присутності мінливих візуальних елементів, що мають інформаційне навантаження – розважальне, рекламне, повідомляюче тощо).

Ці три напрямки в однаковій мірі інтегровані як у комунікативну так і функціональну концепції багатофункціональності громадських будівель і разом створюють складну структуру предметної області теоретичного охоплення даної теми. Запропонована система розподілу знань, однак, є не лише інтелектуальною рефлексією, але також підґрунтям для створення кола практичних рекомендацій для подальшого вдосконалення проектних практик, а також творення власної ідентичності багатофункціональності в архітектурі.

Новизна викладеного у статті матеріалу пов'язана з тим, що майбутній розвиток проектного мислення в галузі багатофункціональності будівель та просторів, передбачувано, пов'язаний з пошуком та розвитком різних форматів поєднання і взаємодії комунікативності та функціональності, а також розширення їх семантичного та технологічного наповнення.

Ключові слова: архітектура, багатофункціональність, проектування, комунікація, функціональність, гармонізація, цифровізація, оптимізація, громадські простори.

Стаття надійшла до редакції 29.05.2025

Стаття прийнята до друку 12.06.2025

Дата публікації статті 24.09.2025

This work by © 2025 by Opryshko R.A. is licensed under CC BY 4.0

**AUTHENTICITY 30 YEARS LATER IN THE CONTEXT
OF THE 1994 NARA CONFERENCE**

Chahovets O., postgraduate,
Olesia.Chahovets@kname.edu.ua, ORCID: 0009-0007-9160-0210
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
17 Chornohlazivska St., Kharkiv, 61002, Ukraine

Abstract. The Ukrainian experience of architectural heritage losses caused by war raises a fundamental question for the professional community: what exactly should be preserved when reconstructing destroyed heritage – the material, the image, the function, or the meaning? In this context, the concept of authenticity becomes critical, going beyond a purely theoretical category and turning into an essential decision-making tool in restoration, reconstruction, and reproduction.

The aim of the study is to determine whether the Nara Document represented a paradigmatic shift in attitudes toward heritage or merely formalized an already existing plurality of interpretations. Methodologically, the research relies on contextual, discursive, and comparative analysis, as well as a meta-analysis of Michael S. Falser's text, which reconstructs the main vectors of debate at the Nara Conference.

The focus is on current challenges, analysed through materials from the 2024 conferences in Thessaloniki and Tokyo, where the tension between flexibility and the need for methodological clarity was highlighted, against the backdrop of the continued absence of a single internationally recognised methodology for assessing authenticity.

The article explores how authenticity operates not only in normative documents but also in decision-making practices, the formation of local policies, and institutional procedures that directly affect the fate of heritage sites. It is concluded that the Nara Document did not provide a fixed definition of authenticity but changed its philosophical framework: authenticity is now understood as the result of dialogue between cultures, practices, and communities – a dialogue that requires not only remembering but also rethinking in the face of contemporary challenges, ethical responsibility, and the transformative potential of heritage.

Keywords: authenticity, Nara Document, cultural heritage, reconstruction, re-creation, cultural relativism.

Introduction. In 2024, thirty years have passed since the adoption of the Nara Document on Authenticity (1994) – an event that significantly reshaped approaches to understanding, assessing, and preserving cultural heritage in global practice [1]. This anniversary represents a milestone and an occasion for critical reflection on how the notion of «authenticity» has transformed in international conservation theory, and to what extent the Nara Document truly became a turning point.

The document emerged in response to growing doubts about the universality of materially oriented heritage assessment criteria embedded in the Venice Charter (1964) and UNESCO's Operational Guidelines (1977) [2, 3]. For the first time at the international level, the need for cultural diversity, respect for intangible factors, and recognition of multiple interpretations was acknowledged. However, both the text of the document and the course of the conference revealed not so much the consolidation of a new consensus as the emergence of diverse—and at times conflicting—approaches to authenticity.

These divergences were never overcome; on the contrary, they became the foundation of a long-lasting intellectual debate that continues today. This is evidenced, in particular, by two major events held on the occasion of the thirtieth anniversary of the Nara Document: the international conference «Authenticity from a European Perspective: 30 Years of the Nara Document on Authenticity» (Thessaloniki, 2024), which brought together leading scholars, practitioners, and institutional representatives for a critical reflection on European approaches to authenticity, and the «35th Seminar,

30 Years of the Nara Document in the Global Context of Heritage Conservation» (Tokyo, 2024).

Despite the global significance of authenticity, the term still lacks a stable definition in heritage theory and practice. After Nara, it ceased to function as a fixed criterion and instead became a field of multiple—sometimes incompatible—interpretations, complicating the development of unified methodological approaches. This has generated a persistent tension between the need for flexibility and the demands of normativity, especially under the pressures of today's challenges: war, loss, hybrid reconstructions, and the growing role of local communities.

For Ukraine, this issue carries particular weight. The large-scale destruction caused by war intersects with long-standing decline and institutional weakness in the heritage sector. In these circumstances, the question of authenticity acquires not only theoretical but also practical urgency—as a key reference point for decisions about restoration, reconstruction, and re-creation. Without a clear understanding of what is considered authentic—whether material substance, form, function, or collective memory—further actions risk being fragmented, contradictory, or even manipulative.

This study examines how the understanding of authenticity has evolved in the three decades since the adoption of the Nara Document—from a material criterion to a broader field of cultural, functional, and contextual interpretations. At its core lies the question of whether Nara truly inaugurated a new paradigm, or merely captured the fractures and tensions that remain unresolved to this day.

Review of recent studies and publications. Despite its recognised international role, the Nara Document has not yet become the subject of comprehensive research in the Ukrainian academic and professional field. In most cases, references to it appear only sporadically—in lists of international documents alongside the Venice Charter (1964), the Riga Charter (2000), or the Burra Charter (1979–2013)—without a dedicated analysis of its content, historical context, or conceptual impact [4, 5].

In Ukrainian professional discourse, isolated attempts to engage with the notion of authenticity can be traced back to the 1990s, particularly in the pages of the journal «Pam'iatky Ukraïny: istoriia ta kul'tura» [6]. One of the first scholars in Ukrainian academic discourse to systematically address the issue of authenticity in architectural restoration was Olha Plamenytska. She emphasised the difficulty of determining the authentic state of a monument in cases of loss and stratification, stressing that authenticity is not limited to material substance but constitutes a broader category that also encompasses form, historical context, and the multi-layered nature of cultural values [7].

In recent years, the issue of authenticity in the Ukrainian context has been addressed by Oleh Rishniak, who highlights the gap between objectivist approaches to documenting the state of a monument and the need to ensure the «transmission of meaning» across generations. In his writings, authenticity appears not only as a matter of documentary identification, but also as a process of cultural presence of the past within contemporary society [8]. This line of thought has been further developed in more recent studies, particularly in theses devoted to the role of authenticity in adaptive forms of heritage recovery under the conditions of present-day destruction. The emphasis is placed on the idea that authenticity acquires special importance in processes of re-creation, where it delineates the boundary between the preservation of meaning and material loss [9].

At the same time, these individual contributions remain fragmented and have not yet formed a coherent theoretical school or a systematic rethinking of authenticity in the Ukrainian context. In recent publications, the concept is often interpreted primarily as a characteristic of the preserved material state of a monument at a given historical moment [10].

Such a narrowing of focus significantly limits the potential of authenticity as a conceptual tool. As a result, contemporary Ukrainian debate often remains at the level of intuitive awareness of change rather than a comprehensive understanding framed within a renewed methodological paradigm.

By contrast, in international scholarship authenticity has become the subject of interdisciplinary analysis – undertaken by restoration theorists, cultural historians, heritage professionals, and critics of the postcolonial order [11–13]. The Nara Document is regarded as a turning point that opened the way to a plurality of approaches, acknowledged the cultural relativity of authenticity criteria, and laid the foundation for dialogue among diverse regional traditions [14]. A number of studies explore the tension between universalism and relativism: on the one hand, the aspiration toward flexible approaches; on the other, the need to maintain consistent principles so as

to prevent authenticity from being instrumentalized for political or commercial purposes [15, 16].

A special place belongs to the work of Michael Falser, who carefully reconstructs the course of discussions at the Nara conference and analyses five key vectors associated with the notion of «authenticity» [17].

The aim of this study is to analyse how the understanding of authenticity in the field of cultural heritage conservation has transformed since the adoption of the Nara Document on Authenticity (1994), and to determine whether this document constituted a genuine paradigm shift or rather recorded the plurality and tensions within approaches to heritage assessment.

Research tasks. To identify the historical and conceptual preconditions for the emergence of the Nara Document – particularly through an analysis of the content of charters, official international instruments, and UNESCO’s Operational Guidelines; to examine how the concept of authenticity has evolved from a normative criterion to a dynamic and contextual approach; and to carry out a meta-analysis of Michael Falser’s work «From Venice 1964 to Nara 1994 – Changing Concepts of Authenticity?» in order to reconstruct the key themes and discursive tensions of the 1994 Nara conference.

Materials and methodology. The study is based on a qualitative analysis of sources, including official international documents (1964–1994), academic publications (1990s–2020s), and materials from two events held in 2024 to mark the thirtieth anniversary of the Nara Document – the JCIC international seminar in Tokyo and the ICOMOS conference in Thessaloniki. The research combines several interrelated methods: contextual analysis, aimed at identifying the historical, institutional, and cultural preconditions for the formation of the authenticity discourse; discourse analysis, applied to trace the use of concepts across different professional domains; comparative analysis, which enabled the examination of the evolution of «authenticity» across intercultural and temporal dimensions; and a meta-analysis of Michael Falser’s work, designed to uncover internal tensions between universalist and relativist approaches as well as the sociocultural factors that shaped the document.

Research results. The term «authenticity», which today stands at the centre of heritage conservation, was absent from the earliest international documents and lacked a stable meaning in the first normative texts. Its emergence and subsequent institutionalisation were the outcome of a complex process of gradual conceptual elaboration, in which international charters of the 1930s–1970s played a decisive role.

In the Athens Charter for the Restoration of Historic Monuments (1931), adopted at the International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, the concept of «authenticity» does not appear at all [18]. The document is formulated primarily within a technical framework, focusing on the preservation of material, structures, and stylistic integrity. Particular attention is given to the principles of restoration, especially the admissibility of analytical reconstruction and the rejection of stylistic imitation.

Of far greater significance was the Venice Charter (1964), which for a long time served as the normative foundation for international heritage policy. It was in the Venice Charter that the word «authenticity» was used for the first time, notably in the Preamble, which speaks of passing on monuments in «the full richness of their authenticity» («...in the full richness of their authenticity...»). Article 9 also stresses respect for «original material and authentic documents» («...respect for original material and authentic documents»). Yet despite this appearance, the term received no theoretical elaboration in the text – no definition, no criteria, and no tools for assessment [17].

The actual transformation of authenticity into an instrument of international evaluation took place in 1977 with the adoption of the Operational Guidelines [3]. At that point, the so-called «Test of Authenticity» was introduced – a formalised set of criteria to be applied to cultural properties nominated for World Heritage status. The approach was materially oriented, and the four criteria included design, materials, workmanship, and setting.

The criteria were formulated within the European restoration tradition and focused primarily on material, style, and construction, leaving aside functional, ritual, spiritual, and intangible dimensions that are central to the perception of heritage in many non-European cultures [14]. This materialist bias provoked strong criticism and called into question the universality of existing

approaches. In response, during the 1980s–1990s the very foundations of evaluation were gradually reconsidered – a need emerged to broaden the concept of authenticity so that it would encompass the full range of values that communities attribute to their heritage [15].

This shift unfolded against the background of a wider typological expansion of the very notion of cultural heritage. To the classical objects – historic buildings, ensembles, and architectural monuments – new categories were added: cultural landscapes, industrial and vernacular architecture, everyday heritage, and later intangible heritage. At the same time, criticism emerged of Eurocentric standards by which heritage from other regions had been measured.

As Michael Falser notes, the Venice Charter and the early UNESCO documents were the product of predominantly European specialists, oriented toward stone, monumental, and stylistically refined architecture. In 1964, of the 23 participants at the Venice conference, 20 were from Europe; the only representative from Asia was Hiroshi Daifuku, the UNESCO delegate [17].

Practices characteristic of Asia, the Pacific region, Africa, Latin America, and the Islamic world – had no voice in the global regulations. This imbalance later provoked debates on the need to «decolonise the criteria of authenticity» [11], as well as on the idea that the concept should be sensitive to context, function, ritual, and technique, and not limited solely to «original materials» [12].

In contrast to the Venice conference, whose participants were almost exclusively Europeans, the Nara conference was deliberately organised as a global forum intended to ensure broader geographical, cultural, and professional representation. Among the 45 participants, 24 represented Europe and North America, 17 came from the Asia–Pacific region (including 8 from Japan), 2 from Africa, and 2 from Latin America and the Caribbean. At the same time, there was no representation from the Arab countries, which left the structure of participation uneven.

Despite its declared novelty, the Nara Document did not reject the provisions of the Venice Charter but positioned itself as their development and complement. The Preamble explicitly states that the principles of the Charter remain fundamental, yet under the conditions of globalisation, cultural homogenization, nationalism, and the suppression of minorities, there is a need to broaden the understanding of authenticity [1, § 3].

Particular attention at the Nara conference was devoted to Japanese practices of preserving wooden architecture, which challenged the European tradition’s dominant understanding of authenticity as the conservation of original material. Japan served not only as the organiser but also as a symbolic stage for a conceptual confrontation – between material fixation and ritual continuity. The example of the Ise Jingū shrine complex, which is entirely rebuilt every 20 years as part of a sacred ritual, illustrated this tension [19]. Despite the loss of the primary material, the form, technique, location, and ritual are preserved – that is, what sustains function, meaning, and intergenerational connection (Fig. 1). This approach demonstrates that authenticity may reside not in substance but in action, continuity, and significance – and it has no direct counterpart in European restoration models.



Fig. 1. The Ise Jingū shrine complex, Japan

The Nara Document consists of 13 paragraphs that can be provisionally divided into three parts. Preamble (§1–4). It proclaims respect for cultural diversity and calls for the application of the criterion of authenticity with reference to local values. The Document is presented as a continuation of the Venice Charter, responding to the challenges of globalisation, ideologies, and shifts in collective memory. Cultural diversity (§5–8). Authenticity is considered in relation to different forms of heritage

expression – both tangible and intangible. Responsibility for safeguarding this diversity is emphasised as lying with local communities as well as with the international community. Values and authenticity (§9–13). Authenticity is recognised as a key criterion for assessing the value of heritage. For the first time, a broader spectrum of its aspects is listed – ranging from material to «spirit and feeling». The contextual and interpretative nature of authenticity is underlined.

Based on an analysis of the Nara conference materials, Michael Falser identifies five central themes around which the presentations and debates were organised. Taken together, they mark a transition from material to sociocultural authenticity.

1. Pluralism, respect, public access. This theme concerns the recognition of the plurality of heritage forms and the typological expansion from monumental to vernacular, industrial, commercial, and intangible heritage. Conference participants emphasised the need for respect toward diverse materials (not only stone, but also wood, earth, straw), the inclusion of traditional knowledge, rituals, languages, techniques, and the guarantee of access to heritage not only for experts but also for citizens.

2. Process, dynamics, living heritage. Authenticity in this theme is approached not as a property of the object but as an ongoing process of community interaction with memory, function, and use. The notion of «living heritage» was introduced, highlighting the dynamic character of meaning, its continuous transformation, and heritage as a «living structure» that responds to change.

3. Postcolonialism and indigenous identities. The focus here is on the critique of Eurocentric transmission of conservation standards to the postcolonial world. Participants from Latin America, Africa, and Oceania pointed to the mismatch between «universal» norms and local values, the need to recognise indigenous practices and rituals, and the critique of colonial narratives as forms of «historical falsification». Japanese experience was especially discussed as an alternative system – reconstruction that is documented yet ritualised, preserving not the material but the function and tradition.

4. Cultural relativism and strategic risks. This theme highlights the tension between the aspiration to inclusivity and the threat of disorder. On the one hand, it was acknowledged that authenticity cannot be unified; on the other – concerns were expressed that the boundaries of authenticity risk becoming blurred and that the very possibility of expert evaluation could disappear.

5. Essence, message, reconstruction in the postmodern era. This theme focuses on the most contentious issue of the conference – the admissibility of reconstructions and their authenticity. The debate revealed two opposing positions: on the one hand, reconstruction is considered acceptable if it can preserve and transmit the cultural or symbolic meaning of a site; on the other – it is seen as a threat to authenticity, since it creates the illusion of historical credibility and blurs the line between fact and interpretation.

These themes, first articulated in Nara, have not lost their relevance thirty years later – on the contrary, they have become the foundation for new debates. The international conference «Authenticity from a European Perspective: 30 Years of the Nara Document on Authenticity» was held on 28–29 November 2024 in Thessaloniki (Greece), in the multicultural venue «Islahane» [20]. The event was organised by the ICOMOS International Scientific Committee on Theory and Philosophy of Conservation and Restoration (TheoPhilos ISC), in cooperation with the Ministry of Culture of Greece and with the support of the Hellenic National Committee of ICOMOS. The conference brought together participants from more than ten countries – including Poland, Greece, Slovenia, China, Italy, France, Belgium, Ukraine, Germany, Austria, Norway, and the United Kingdom – representing a wide spectrum of research and practical approaches to heritage.

The themes of the conference ranged from a historical analysis of the impact of the Nara Document to the new challenges facing heritage conservation – particularly in the context of loss, reconstruction, climate change, political transformations, and digital technologies. The event represented the first large-scale attempt to critically reassess the legacy of the Nara Declaration thirty years after its adoption.

The conference materials showed that the key contradictions revealed by the Document have not only remained unresolved but in some respects have become even more acute. In his opening address, Bogusław Szmygin – president of the Theophilos office – observed: «we still do not have a methodology for assessing authenticity» [21]. Despite numerous declarations and conceptual

frameworks, tools for balanced analysis are still lacking – what exactly is authentic, to what extent, by which parameters, and how these assessments relate to one another. What we are left with are formal «statements of authenticity», but without a verifiable procedure of analysis.

Against this background, the presentation by Łukasz Sadowski on the Polish experience of castle reconstructions serves as an illustration of how the absence of clear ethical and methodological criteria allows historical fictions to be masked as heritage preservation. He remarked: «if you have money and political connections – you can build whatever you want», while at the same time acknowledging the growing critical resistance from professionals and the public [22]. He pointed to the Royal Castle in Poznań as a case in point – a fantasy construction stylised as a sixteenth-century castle (Fig. 2).



Fig. 2. The Royal Castle in Poznań. Before and after reconstruction

The presentations at the conference also demonstrated that the departure from universalist approaches initiated in Nara, while necessary, did not provide a new stable foundation. Authenticity is increasingly perceived not as a fixed property of an object, but as a contextual agreement – the outcome of negotiations among experts, communities, policymakers, and institutions. In this regard, the paper by Jolka Pirković is illustrative: she proposes not to search for a single definition of authenticity but to recognise its plural nature, manifested in different dimensions – documentary, social, artistic, and others [23].

Liu Siyuan suggested distinguishing between several forms of «truth» – expressive, historical, and structural – and emphasised honesty as the principal professional value in reconstruction. In this context, he outlined the notion of viable interpretation – one that acknowledges changeability while avoiding falsification [24].

Ioannis Poullos, in his presentation, drew on the logic of strategic thinking, criticizing the divide between material and intangible approaches. In his view, overcoming this separation is a prerequisite for a new paradigm of heritage – one that is more holistic, flexible, and responsive to real challenges [25]. Within this new field, authenticity is no longer sought in the past – it is constructed in the present as a form of critical responsibility.

Despite the diversity of positions and attempts to overcome methodological vagueness, the conference in Thessaloniki demonstrated that authenticity remains a complex concept.

These very questions – but viewed from a different, non-European perspective – were raised at the seminar «Authenticity Revisited: The Nara Document Thirty Years After», held in Tokyo on 28 November 2024 [26]. Organised by the Japan Consortium for International Cooperation in Cultural Heritage (JCIC-Heritage) in cooperation with the Agency for Cultural Affairs of Japan, the event brought together experts from Asia, Africa, and Europe to critically reassess the legacy of the Nara Document in a global perspective (Fig. 3).

The central issue was the relevance of the Nara Document under conditions of political transformations, technological change, and intercultural tensions. Among the leading themes were the tension between the universality of standards and local sensitivity, the impact of digital technologies on understandings of authenticity, the growing role of communities in shaping heritage policies, and the critique of professional approaches that reduce authenticity to an object-based characteristic. A distinctive feature of the seminar was the strong presence of Asian voices: they

emphasised that the Nara Document not only opened the way to intangible and contextual thinking about heritage, but also itself requires reconsideration – whether it still retains transformative power or has already become part of a new orthodoxy.



Fig. 3. Participants of the seminar
«Authenticity Revisited: The Nara Document Thirty Years After». Tokio, 2024

In the three decades since the adoption of the Nara Document, the global community has not achieved either a stable understanding of authenticity or an agreed methodology for its assessment. Despite the declarative recognition of multiple approaches, the equilibrium points between context and criterion, between flexibility and responsibility, have not yet been found. Authenticity remains an unresolved concept, an open field of tension – between professional standards and political demands, between collective memory and institutional norm, between reconstruction and simulation. What in 1994 was named a challenge reappears in 2024 as an unresolved question, one that calls not only for reflection but also for new conceptual frameworks.

Conclusions. Thirty years after its adoption, the Nara Document on Authenticity demonstrates that it did not close the debate – it opened it. Nara did not provide a final definition of authenticity, but redefined the very logic by which authenticity should be assessed. For the first time at the international level, it was formally recognised that authenticity is culturally contextual; those multiple interpretations are legitimate; and that no single universal criterion can be equally valid across all cultures.

The Document legitimised a shift from the material object to the social process – from authenticity as a «state of things» to authenticity as an effect of interpretation, memory, ritual, use, and function. Since its adoption, a new type of heritage discourse has emerged: pluralist, flexible, and dialogic. Intangible dimensions have received institutional recognition; local communities have gained greater influence in processes of interpretation and conservation; and the universality of the previously «neutral» European norm of preservation has been called into question.

Yet Nara did not resolve internal contradictions. As recent conferences have shown, the ideals of plurality and flexibility often collide with the need for methodological and practical criteria. Paradoxically, the very document intended to free heritage from normative pressure has itself become a new framework – one to which subsequent international declarations and institutional practices must now relate.

References

- [1] ICOMOS; UNESCO. The Nara Document on Authenticity: adopted in Nara, Japan. 1994.
- [2] ICOMOS. International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (The Venice Charter): adopted at the 2nd International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments. 1964.
- [3] UNESCO. Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention. First Session. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Paris. 1977. 16 p. [Online]. Available: <https://whc.unesco.org/archive/opguide77b.pdf>. Accessed on: August 13, 2025.

- [4] ICOMOS. Riga Charter on Authenticity and Historical Reconstruction in Relationship to Cultural Heritage: adopted in Riga. 2000.
- [5] Australia ICOMOS. The Burra Charter: The Australia ICOMOS Charter for Places of Cultural Significance. 2013.
- [6] "Vidtvorenna vtrachenykh pam'iatok: istorychnyi ta pravovyi aspekty", *Pam'iatky Ukrainy: istoriia ta kul'tura*, no. 3–6, pp. 134–148, 1994.
- [7] O. Plamenytska, "Bukva i dukh arkhitekturnoi restavratsii (avtentychnist' versus dostovirnist')", *Kul'turna spadshchyna: zbirnyk naukovykh prats'*, no. 1(10), pp. 11–31, 2017.
- [8] O.B. Rishniak, "Restavratsiina diial'nist' v Ukraini v konteksti svitovykh pam'iat'skokhoronnykh tendentsii", *Khudozhnia kul'tura. Aktual'ni problemy*, vol. 16, no. 2, pp. 153–157, 2020.
- [9] O. Chahovets, "Avtentychnist' i adaptatsiia: sotsial'ni vyklyky restavratsii v umovakh suchasnykh ruinuvan'", In: *Suchasni problemy ta perspektyvni napriamky innovatsiinoho rozvytku mista: zb. tez dop. IV mizhnar. nauk.–prakt. konf.*, Odesa, 2024, pp. 221–224.
- [10] L. Prybieha, "Poniattia avtentychnosti v arkhitekturnomu pam'iatkoznavstvi i restavratsii", *Ukrains'ka akademiia mystetstv*, no. 31, pp. 7–14, 2022.
- [11] S. Labadi, "World Heritage, authenticity and post-authenticity: International and national perspectives", In: S. Labadi, C. Long (Eds.), *Heritage and Globalisation*. London: Routledge, pp. 66–84, 2010.
- [12] S. Muñoz Viñas, "Beyond authenticity", In: E. Hermens, T. Fiske (Eds.), *Art, Conservation and Authenticities: Material, Concept, Context*. London: Archetype Publications, pp. 33–38, 2009.
- [13] Jokilehto, "Questions about 'authenticity'", *ICOMOS Scientific Journal*, no. 3, pp. 69–75, 1994.
- [14] A. Orbaşlı, "Nara+20: a Theory and Practice Perspective", *Heritage & Society*, vol. 8, no. 2, pp. 178–188, 2015.
- [15] J.-L. Luxen, "The Nara document: its achievement and its limits", *Conversaciones... on HERB STOVEL*, no. 8, pp.194–206, 2019.
- [16] H. Stovel, "Origins and influence of the Nara Document on Authenticity", *APT Bulletin*, no. 39, pp. 9–17, 2008.
- [17] M. S. Falser, "From Venice 1964 to Nara 1994 – Changing concepts of authenticity?", In: M. S. Falser, W. Lipp, A. Tomaszewski (Eds.). *Conservation and Preservation: Interactions between Theory and Practice. In memoriam Alois Riegl (1858–1905). Proceedings of the ICOMOS International Scientific Committee for the Theory and Philosophy of Conservation and Restoration*, Vienna, pp. 115–132, 2008.
- [18] International Museums Office. Athens Charter for the Restoration of Historic Monuments. 1931.
- [19] K. Timoticin, "Tradition of conservation: redefining authenticity in Javanese architectural conservation", In: *Heritage – International Conference on Heritage and Sustainable Development*. Évora, Portugal, pp. 1–10, 2010.
- [20] ICOMOS. *Theophilos International Scientific Committee. Authenticity from a European perspective: 30 years of the Nara Document on Authenticity: conference abstracts*, Thessaloniki, 2024, [Online]. Available: <https://theophilos.icomos.org/wp-content/uploads/2024/11/20241128-Abstracts-v3.pdf>. Accessed on: August 13, 2025.
- [21] B. Szmygin, "Authenticity - Assumptions for the Methodology of Analysis", 2024. [Online]. Available: <https://youtu.be/CWZ0T0zAeR0?t=1263>. Accessed on: August 13, 2025.
- [22] L.M. Sadowski, "Authentic or not? An Art Historian's Reflections on Castle Reconstructions in Contemporary Poland", 2024. [Online]. Available: <https://youtu.be/jxr0eMLTDn8?t=9057>. Accessed on: August 13, 2025.
- [23] J. Pirkovič, "Heritage Authenticity as a Source of Personal and Collective Identity", *Varstvo spomenikov / Protection of Cultural Heritage*, vol. 22, pp. 34–47, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.35784/odk.6820>. Accessed on: August 13, 2025.
- [24] S. Liu, "Authenticity as the Legacy of Romantics and Modernists: The Pursuit of Truth versus Falsification, Facadism, and Anachronism in Reconstruction", 2024. [Online]. Available: <https://youtu.be/jxr0eMLTDn8?t=15435>. Accessed on: August 13, 2025.

- [25] I. Poullos, "Moving Beyond Authenticity: Perspectives from Business Strategy Theory", 2024. [Online]. Available: <https://youtu.be/CWZ0T0zAeR0?t=12466>. Accessed on: August 13, 2025.
- [26] Japan Consortium for International Cooperation in Cultural Heritage. *Report of the 35th JCIC–Heritage Seminar: Rethinking the Nara Document on Authenticity in the Contemporary World*. Tokyo: JCIC–Heritage, 78 p, 2024. [Online]. Available: <https://www.ourworldheritage.org/posts/30-years-of-the-nara-document-in-the-global-context-of-heritage-conservation>. Accessed on: August 13, 2025.

АВТЕНТИЧНІСТЬ 30 РОКІВ ПОТОМУ У КОНТЕКСТІ НАРСЬКОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ 1994

Чаговець О.В., аспірант,

Olesia.Chahovets@kname.edu.ua, ORCID: 0009-0007-9160-0210

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Чорноглазівська, 17 м. Харків, 61002, Україна

Анотація. Український досвід втрат архітектурної спадщини, спричинених війною, висуває перед фаховою спільнотою принципове питання: що саме ми маємо зберігати, відтворюючи зруйновану спадщину – матеріал, образ, функцію чи сенс? У цьому контексті поняття автентичності набуває критичного значення, виходячи за межі суто теоретичної категорії й перетворюючись на необхідний інструмент ухвалення рішень у сфері реставрації, реконструкції та відтворення.

Стаття аналізує трансформацію уявлень про автентичність у міжнародній охоронній практиці після ухвалення міжнародного Документа Нара (1994) про автентичність, що започаткував перехід від матеріального критерію до ширшого, культурно чутливого, між суб'єктивного розуміння.

Метою дослідження є з'ясувати, чи справді Документ Нара став парадигмальним зсувом у ставленні до спадщини, чи радше закріпив вже наявну множинність трактувань. Методологічно дослідження спирається на контекстуальний, дискурсивний і порівняльний аналіз, а також метааналіз тексту Міхаеля Фальзера, що реконструює основні вектори дебатів конференції в Нарі.

У фокусі – сучасні виклики, проаналізовані через матеріали конференцій у Салоніках і Токіо (2024), де окреслено конфлікт між гнучкістю і потребою у методологічній визначеності, на тлі тривалої відсутності єдиної міжнародно визнаної методики оцінки автентичності.

Розглянуто, як автентичність функціонує не лише у нормативних документах, а й у практиках прийняття рішень, формуванні локальних політик та інституційних процедур, що впливають на реальну долю об'єктів спадщини.

У підсумку показано, що Нара не дала стабільного визначення автентичності, але змінила її філософську рамку: відтепер автентичність трактується як результат діалогу між культурами, практиками та спільнотами, що вимагає не лише пам'ятати, а й переосмислювати з огляду на сучасні виклики, етичну відповідальність і трансформативний потенціал спадщини.

Ключові слова: автентичність, Документ Нара, культурна спадщина, реконструкція, відтворення, культурний релятивізм.

Стаття надійшла до редакції 14.08.2025

Стаття прийнята до друку 8.09.2025

Дата публікації статті 24.09.2025

[This work by](#) © 2025 by [Chahovets O.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

ELEMENTS OF NATURE-INTEGRATED ARCHITECTURE – RECREATIONAL AREAS ON THE ROOFS USING THE RECUPERATIVE HEAT OF VENTILATION SYSTEMS

¹**Shushliakov D.O.**, PhD, Associate Professor,

golova04@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9448-7707

¹*Research and Production Company «Energy, Utilities and Industry» LTD*

16, Himnaziina naberezhna St., Kharkiv, 61000, Ukraine

²**Shushliakova O.S.**, Architecture PhD,

shushliakovao@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7457-0071

²*O.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy*

17, Chornohlazivska St., Kharkiv, 61002, Ukraine

Abstract. The issues of organizing recreation areas at the district level for large and largest cities were studied. These recreation areas are one of the primary tasks in the current conditions of physical and psychological stress on the population of cities. At present, the population of most Ukrainian cities has grown sufficiently, and the number of recreation areas, especially local (district-type) ones, has remained virtually unchanged.

Based on the analysis of architectural and architectural-planning solutions of modern urban development, it is proposed to use the roofs of high-rise buildings for such areas, for which purpose they should be landscaped.

Recreational areas on exploited roofs as an element of nature-integrated architecture are considered. The issue of exploitation of flat roofs, their use as recreational areas, gardens with shrubs or even trees, gazebos, recreation areas, greenhouses or winter gardens is investigated.

To create high-quality conditions for plant growth on roofs and create green areas (winter gardens, greenhouses, greenhouses, etc.), it was proposed to use the low-potential heat of ventilation emissions. For this purpose, the use of both the heat of ventilation emissions directly (for heating the soil) and the use of systems with an intermediate heat carrier, for example, with heat pipes for heating, for example, water for plant irrigation, was considered.

Some problems of utilization of low-potential heat in systems with natural exhaust air movement are considered. Ways to solve urgent problems in this direction are identified.

To increase the temperature potential of ventilation emissions, the possibility of using emissions from the kitchen area and the area of sanitary facilities, the use of heat pumps is proposed, which can increase the thermal potential of ventilation emissions. An installation scheme for increasing the temperature potential of ventilation emissions is proposed. Its advantages and disadvantages are considered.

Keywords: nature-integrated architecture, recreational area, flat roof, green roof, use of low-potential heat.

Introduction. Recreation (latin - recreatio – rest) – is a system of events and functions related to the use of people's time outside of their working hours for recreational, cultural or sports activities in areas prepared for such activities that are located outside their permanent residence.

According to the Law of Ukraine, [1] «recreational areas are areas of land and water space intended for organised mass recreation and tourism». At present, the population of most Ukrainian cities has grown significantly despite martial law, and the number of recreational facilities, especially local (district) ones, has remained virtually unchanged.

Review of recent research and publications. In modern cities, especially large and largest ones, according to the results of studies conducted by Stolberg F.V., Tkachenko T.N., Tkachenko A.A., Rybak O.M., [2-8], the issues of reducing the area for green spaces, organising recreation areas at the district level are quite acute.

The organisation of «green roofs» can help to solve the issue of creating short-term recreation areas for citizens near their place of residence, so the topic of this article is relevant [5, 6].

Based on the analysis of architectural and architectural-planning solutions of modern urban development conducted by Kraynikovets O.V., Shvets V.V., and Shushlyakova O.S. [5-8], it is necessary to point out the tendency of flat roofs in most multi-storey buildings, especially in the so-called "sleeping areas". If earlier a flat roof was considered a fairly "cheap and easy option" for covering a modern building, nowadays a flat roof has completely changed its role – now that its operation has become possible thanks to the latest technologies, a flat roof adds not only additional space but also originality to the design of any building: a flat roof can become a new garden, with shrubs or even trees, a gazebo, a recreation area, a greenhouse or a winter garden, that is, it can be used as a recreational area. With such a seemingly attractive engineering solution, a number of problems arise, which have been considered in some works, for example, by Hetun G.V., Shushlyakov D.O., Serdyuk V.R. [9-11], related to the additional load on building structures, the complexity of organising the installation of these facilities, as well as issues related to the energy and heat supply of such facilities.

The issues of reinforcing building structures, installing objects on roofs and power supply are not covered in this article.

Let's consider the issue of heat supply to such an object as an exploited roof.

At the present stage, the issue of saving energy, especially thermal resources, is quite acute all over the world. In Ukraine, according to studies by Karpalyuk I.T., Shushlyakov D.O., Shulga M.O., Usyk G.A. and others [12-16], about 40% of fuel and energy resources are spent on heating and ventilation of buildings, which is several times higher than in advanced countries. In buildings currently in operation, the share of heat used to heat ventilation air ranges from 30-55%, and in some cases reaches 80%.

In order to save heat energy, modern ventilation systems are equipped with various additional units that allow utilising the heat of the exhaust air, for example, recuperators, heat exchangers of various designs [15, 16]. If at least 10% of the heat of the exhaust air is used to heat the supply air for one 100 m² apartment, the savings will be more than 400 W per hour. On the scale of cities with hundreds of thousands or millions of people, this will amount to several tens of megawatts.

However, according to the research of scientists (Bozhenko M.F., Khairnasov S.M., Shushlyakov D.O., Molsky S.M. [16-20]), for ventilation systems with natural air movement, which are mainly used to supply existing residential and public buildings with fresh air, such equipment is very difficult to use – the air supply to the premises is not organised, the air enters the premises through infiltration or aeration. In addition, in residential and many public buildings, the use of conventional recuperators is prohibited, as the exhaust air flows into the supply air (during the operation of plate and rotary recuperators).

Purpose and objectives of the study. The purpose of the study is to substantiate the need to create «green roofs» and to identify some of the main ways of providing heat for local (local) recreation areas on the roofs of multi-storey buildings for residents of these buildings, which are associated with the use of low-potential heat from secondary energy resources.

In order to achieve the aim of this study, the following tasks need to be performed:

- to analyse the need for recreation areas at the district level;
- to analyse the main ways of using low-potential heat sources of secondary energy resources for heating «green roof» equipment.

Materials and methods of the study. The study of the organisation of recreational areas on roofs using the recuperative heat of ventilation systems is based on the analysis of scientific sources published in the first decades of the twenty-first century.

The main material of the study was based on the works that reveal the problems of this issue and its main aspects.

Research results. The current growth of the urban population has led to problems in the social, economic and environmental spheres. Urban development has a very high density, which leads to a catastrophic decline in the area of green spaces in the central part of cities, the

disappearance of parks and squares. Recreational areas are disappearing and shrinking not only in city centres, but also in «sleeping areas», as well as suburban green spaces that serve as «green lungs of cities». In other words, such green areas are a source of oxygen for the city and support biodiversity. In addition, they maintain more comfortable thermal and humidity conditions in cities - due to the lack of large areas of green space in central areas, there is a «heat island» effect, when the temperature difference between central urban and suburban areas is about 4...7°C [4]. The factors that negatively affect the population of large cities also include environmental factors, such as air pollution with gaseous and particulate matter from enterprises and transport. This includes not only harmful substances (dust, NO_x, SO_x, CO₂, etc.), but also toxic and carcinogenic emissions (CO, lead, mercury, benzo- α -pyrene, etc.). While the amount of harmful substances is growing and requires a significant increase in the area of 'absorbers', such as plants, there is a significant reduction in green spaces, which leads to a significant deterioration in the environmental condition of cities [7, 14].

Scientists have found that in recent decades there has been a disturbance in the ecological balance caused, to a large extent, by human construction activities, which absorb a significant quantity of resources in the form of building materials and during the operation of buildings and structures. Scientists recognise the reduction of natural space, especially in highly urbanised environments, as one of the irreparable losses caused by human construction expansion. The rapid pace of urbanisation and the construction of new residential areas are leading to an increasing reduction in the landscape component of cities, and natural areas are being built up in the largest and most populous cities in the world, including in Ukrainian cities [8]. This trend is especially true for settlements with high land values.

The development of large and largest cities disrupts and changes the relationship between humans (city residents) and the environment. This connection is being replaced by regulatory documents that establish a standardised area of greenery per person. The emotional and spiritual component of nature is removed, and only plantings grass, bushes and trees remain.

A one-sided, consumerist understanding of green spaces in the city completely drowns out the «human-nature» connection. This process leads to the fact that, even if there is sufficient green space, people do not feel comfortable in the city.

As a result, the problem of finding such natural forms that would preserve the connection between nature and people living in the urban environment, would satisfy their need for green spaces, their aesthetic needs and, at the same time, would not contradict the development of the urban environment, is becoming more acute.

Currently, there is a need to introduce «wildlife» into the urban environment. Elements of nature-integrated architecture and their inclusion in the structure of residential and public buildings in large cities will help to solve this problem. The most popular method of integrating the natural component into architectural objects is the installation of green roofs and equipment on the roofs of recreational areas. This is a way to solve the lack of greenery in the urban environment, it provides an opportunity to incorporate the natural component into buildings, to saturate the modern city with greenery without trying to find additional territorial resources. In modern cities with a high population density, greenery is increasingly developing in three dimensions, with rooftop recreation centres being used more and more often every year and occupying a significant place in shaping the architectural environment of cities and urban landscapes, and becoming a means of humanising the urban environment. At the same time, as a form of three-dimensional landscaping, they are called the «fifth facade of the city».

The «fifth facade of the city» is a relevant concept that involves another significant part of the urban environment – the roof of the building – in the development of the architectural urban environment. Such elements of nature-integrated architecture do not take up land, effectively increase the area of urban greenery and improve the environmental situation of the city.

Therefore, the creation of recreational areas on exploited green roofs can be an answer to the problems of modern cities – the lack of a natural component in the urban environment, the deterioration of the ecological state of cities, the deterioration of the mental and physical health of

residents, the loss of architectural expressiveness and the originality of urban development.

Also, rooftop recreational areas have the ability to be fully incorporated into the green infrastructure of urban areas, to serve as one of the structural elements in the green urban framework – a strategically planned network of natural areas in the city.

There are many examples in the world of a harmonious combination of architecture and the natural component of environment (Fig. 1), and the creation of such objects in buildings of various functional purposes.



Fig. 1. Formation of recreational areas on roofs in architectural objects

A number of problems characterise the condition, location and functioning of the recreational facilities of Ukrainian cities:

- insufficiently high level of organisation and architectural and planning solutions of the existing system of recreational areas of cities;
- lack of green areas of mass accessibility in the central districts of the city;
- lack of recreational facilities in residential areas, in areas of historical buildings, near transport hubs;
- lack of recreational facilities in areas of dense residential development;
- disorganisation of pedestrian and transport links between the territories of parks of district

significance and the green framework of cities;

- lack of recreational facilities at the level of residential units (apartments).

And these problems should be solved at all hierarchical levels of the green urban framework: at the city-wide level, at the level of the residential district, at the level of the central city district, at the level of the residential unit.

The system of green urban framework and green infrastructure connectivity in urban areas is formed gradually by creating continuous strips of natural habitats. And in this sense, rooftop recreational areas should be considered as an element of the urban level, which includes parks and urban forestry, as well as green roofs, walls and other techniques to reduce energy consumption and stormwater runoff [3].

Creating a «green roof», placing recreational areas, gardens and parks on the roof is a fairly new trend in Ukraine. At the same time, the use of such solutions has already become the norm in many European countries and the United States. Some countries, such as the USA, the UK, and Germany, support the development and implementation of recreational areas on roofs at the state level.

The arrangement of operated «green» roofs is usually divided into three main types depending on the method of greening used:

- with intensive landscaping;
- with semi-intensive landscaping;
- with extensive landscaping.

Each has its own characteristics and application possibilities, depending on the urban planning conditions and the structural and volumetric-spatial features of the building. Intensive landscaping is used to create full-fledged recreational areas on the roofs. It should include the planting of trees and shrubs, perennial herbaceous plants, and the creation of various types of lawns. The plantings can be placed both on the same level and on different levels of the roof area using geoplastic relief techniques.

An example of one of the first residential buildings in Ukraine with a rooftop park is the Royal Tower residential building in Kyiv (Fig. 2). This decision was made due to the lack of a landscaped adjacent territory. In this case, it was decided to equip it on the roof. The project is based on the idea of creating a park with spreading crowns of mature trees and various varieties of shrubs, with playgrounds and walking paths where residents can relax and at the same time look at the breathtaking panoramas of the capital's centre. In this way, the architects compensated for the lack of land and natural elements in the area.

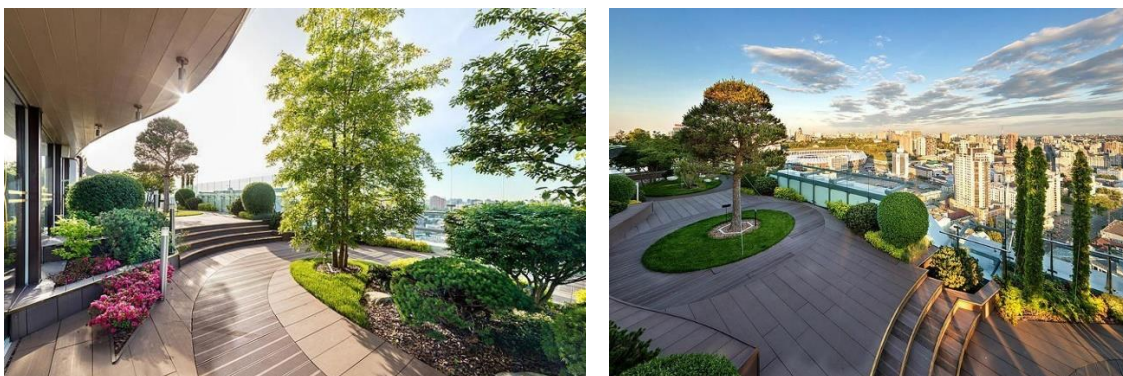


Fig. 2. Recreational space on a residential building. Park on the 31st floor of the Royal Tower building in Kyiv (Ukraine)

Different energy sources can be used to supply green roofs with energy. However, from the point of view of reducing carbon fuel consumption, it is more efficient to use «secondary energy», for example, the heat of ventilation air removed from buildings.

One of the most promising areas in the technique of low-potential heat recovery in ventilation systems, which has not been developed to date, is the use of heat exchangers on heat pipes [18-20].

A heat pipe (Fig. 3) is a circuit with a heat carrier in which phase transitions of the heat carrier from liquid to gaseous state and back are carried out in a cyclical manner [20].

The heat exchanger will consist of several rows of heat pipes installed in a staggered or corridor pattern. One end of the heat pipes will be installed in the exhaust air duct (evaporation zone), the other end will be installed in the supply air duct (condensation area).

The advantage of such a heat exchanger is the high efficiency of heat exchange even with a slight temperature difference between the supply and exhaust air, the absence of air flow from one air duct to another, and the ability to move the supply and exhaust air ducts 2-3 m apart.

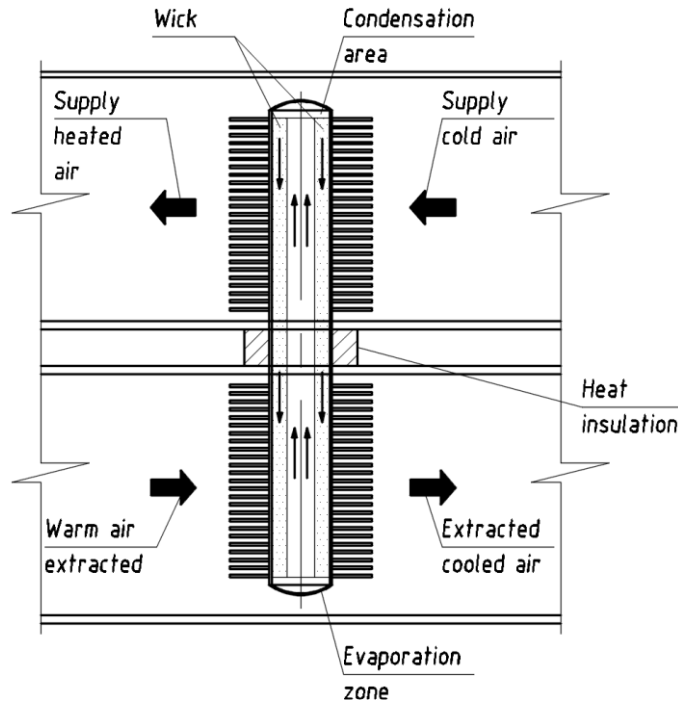


Fig. 3. Scheme of a heat exchanger on heat pipes for ventilation systems

At the same time, it is quite possible to use the heat of the exhaust air if water is used on the "cold side" instead of air. With a recovery of 10-15°C from the exhaust air, it is virtually impossible to heat the water by more than 3-6°C without using additional equipment. Such water with a temperature (in the cold period of 8-10°C) can be used to irrigate the plant carpet on the roof (Fig. 4).

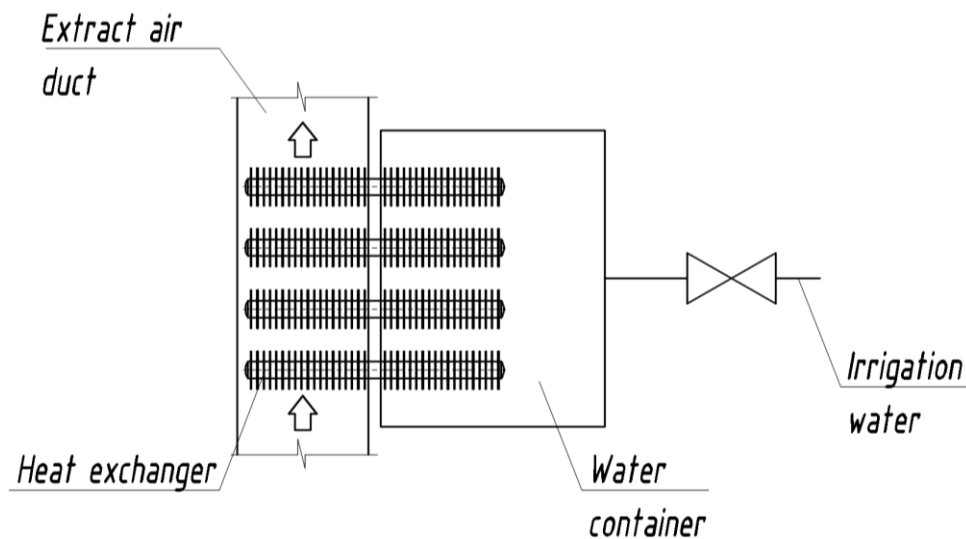


Fig. 4. Utilization of exhaust air heat to heat water for irrigation

The simplest method of heating the soil is to use channels laid under the soil. The air exhausted from the apartments will pass through these channels, maintaining a positive ground temperature. This system cannot be used as a heating system for greenhouses or winter gardens, as the temperature potential of the air in ventilation systems is, as mentioned above, quite low. However, such a system (provided that the horizontal ducts are short and have a minimum number of turns) will allow the soil temperature to be kept positive during the cold season.

A significant disadvantage of this system is that the heat of the air removed from the sanitary facilities [17] cannot be used (according to the regulations [22]) to avoid unpleasant odours entering the recreational area.

It is possible to include a heat pump instead of a heat exchanger on heat pipes in the utilization scheme [21]. This will significantly increase the capital cost of the roof, but such a system (Fig. 5) will allow the heat extracted from the exhaust air to be used for heating (by increasing the temperature potential) of a winter garden or closed gazebos on the roof.

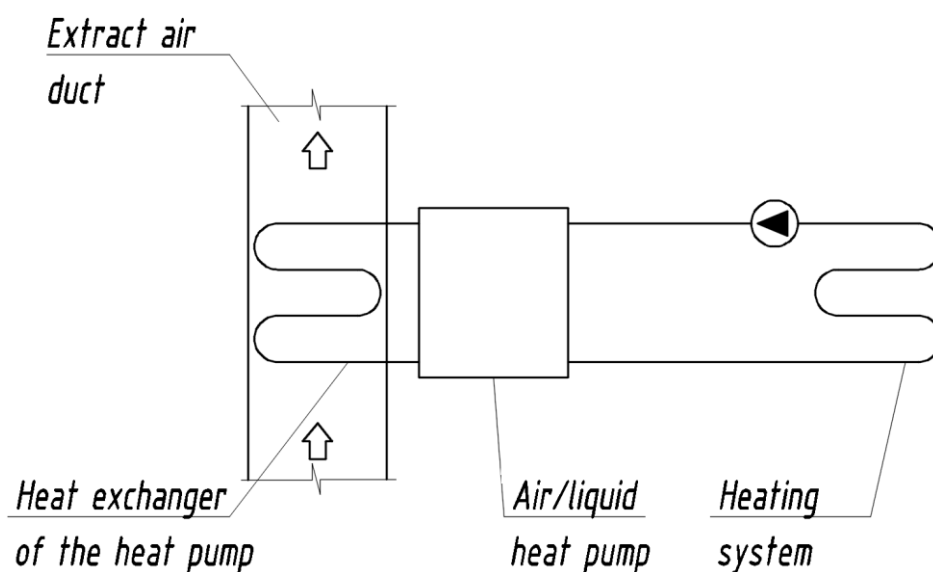


Fig. 5. Utilizations of exhaust air heat for the heating needs of a winter garden or gazebos

Conclusions. The arrangement of exploited roofs will make it possible to organise recreational areas in the «sleeping areas» of large cities, and the utilisation of ventilation air heat will partially solve the issue of heat supply to these facilities.

In our country, in the post-war period, the development of such a trend in nature-integrated architecture as the creation of recreational areas on the exploited roofs of architectural objects of various functional purposes will also become more relevant. This will have great potential in creating a comfortable urban environment and replenishing the natural component of urban areas.

References

- [1] Zakon Ukrainy "Pro okhoronu navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha" vid 25.06.1991r. № 1264-XII (redaktsiia 15.11.2024r.). St. 63. (Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, 1991 r., № 41, st. 546 iz nastupnymy zminamy).
- [2] Sady na dakhakh: yak u vsomu sviti vprovadzhuut zeleni pokrivli. [Online]. Available: <https://rybalsky.com.ua/green-roofs>. Accessed on: May 02, 2025.
- [3] O.M. Rybak, I.V. Patseva, "Zeleni dakhy yak element detsentralizovanoho upravlinnia doshchovoiu vodoiu", *Problemy khimii ta staloho rozvytku*, vyp. 2, pp. 40-46, 2023.
- [4] T.M. Tkachenko, O.A. Tkachenko, "Suchasnyi stan vykorystannia "zelenykh konstruksii" v urbotsenozakh", *Zbirnyk naukovykh prats DonNABA*, pp. 3-30, 2019.

- [5] O.V. Krainykovets, V.V. Didyk, T.M. Maksymiuk, "Sady na dakhakh", *Arkhitektura*, no. 728, pp. 119-125, 2012.
- [6] V.P. Kucheriavyi, *Ozelenennia naselenykh mist*. Lviv: Svit, 2005.
- [7] V.V. Shvets, K.S. Rudenko, O.H. Veremii, "Formuvannia ekolohichnoho karkasu mista. Ukryttia pid zelenym pokryvom", *Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk "Suchasni tekhnologii, materialy i konstruksii v budivnytstvi"*, no. 2(27), pp. 139-143, 2010.
- [8] F.V. Stolberh, Yu.L. Kovalenko, "Vdoskonalennia systemy monitorynhu dovkillia, indykatoriv ekolohichnoho vymiru v ramkakh stratehii staloho rozvytku Ukrainy", *Komunalne hospodarstvo mist*, vol. 132, pp. 88–92, 2016.
- [9] H.V. Hetun, B.M. Rumiantsev, A.D. Zhukov, *Systemy izoliatsii budivelnykh konstruksii: navchalnyi posibnyk*. Dnipro: Zhurfond, 2016.
- [10] Zeleni pokrivli. [Online]. Available: <https://www.sddu.com.ua/uk/pokrivli/zeleni-pokrivli>. Accessed on: May 04, 2025.
- [11] O.M. Antoniuk, O.V. Shulakov, V.R. Serdiuk, "Zeleni pokrivli yak innovatsiine rishennia zapobihannia hlobalnomu poteplinniu", *Konferentsiia VNTU*, pp. 92-96, 2023.
- [12] D.O. Shushliakov, O.S. Shushliakova, A.I. Melnyk, "Vykorystannia system temperuvannia dlia stvorennia komfortnykh umov u budivliakh", *AW-Therm*, no. 5. 2023.
- [13] Dovidnyk montazhnyka. Danfoss. Radiatorni termorehuliatory, zapirni klapany ta prykladia do nykh. Elektroopalennia. Kyiv: Danfoss-TOV. 2009.
- [14] D. Shushliakov, "The application of vortical turbulent washers as apparatuses for integrated purification of gases", *The 5th International scientific and practical conference "Scientific projects on improving the environment, 2023"*, pp. 223-227.
- [15] Osoblyvosti roboty system enerhozberezhennia dlia hoteliv. [Online]. Available: <https://kb99.com/blog/detail/osoblyvosti-roboti-sistem-energozberezhennia-dlya-goteliv/>. Accessed on: April 14, 2025.
- [16] M.O. Shulha, O.O. Aleksakhin, D.O. Shushliakov, *Teplohazopostachannia ta ventyliatsiia*. Kh.: KhNUMH, 2014.
- [17] D.O. Shushliakov, M.O. Shulha, H.A. Usyk, *Inzhenerne obladnannia budivel*. Kh.: KhNAMH, 2011.
- [18] S.M. Khairnasov, "Naukovo-tekhnologichni osnovy stvorennia aliuminiievnykh teplovykh trub dlia resursozberihaiuchykh system": dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.14.06. K.: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2017.
- [19] D.O. Shushliakov, *Bezpeka ekspluatatsii system ventyliatsii, opalennia i kondytsionuvannia budivel*. Kh.: KhNUMH, 2014.
- [20] M.F. Bozhenko, *Systemy opalennia, ventyliatsii i kondytsionuvannia povitria budivel*. K.: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2019.
- [21] S.M. Molskyi, Shcho vazhlyvo znaty pro teplovi nasosy. [Online]. Available: https://www.linkedin.com/posts/serhii-molskyi-631b29a9_%D1%89%D0%BE-%D0%B2%D0%B0%D0%B6%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BE-%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%82%D0%B8-%D0%BF%D1%80%D0%BE-%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D1%96-%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%BE%D1%81%D0%B8-%D1%87%D0%B8-activity-7260184379472195584-UBxB?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAAFsIt-8B0n0CXu65mnn1joF2T3cISRtxLmI. Accessed on: May 21, 2025.
- [22] DBN V.2.5-67:2013 Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia. K.: DP "Ukrakhbudinform", 2013.

ЕЛЕМЕНТИ ПРИРОДОІНТЕГРОВАНОЇ АРХІТЕКТУРИ – РЕКРЕАЦІЙНІ ЗОНИ НА ПОКРІВЛЯХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РЕКУПЕРАТИВНОЇ ТЕПЛОТИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ

¹Шушляков Д.О., к.т.н., доцент,

golova04@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9448-7707

¹ТОВ «Науково-виробнича фірма «Енергетика, комунальне господарство і промисловість»

вул. Гімназійна набережна, 16, м. Харків, 61000, Україна

²Шушлякова О.С., к. арх.,

shushliakova@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7457-0071

²Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

вул. Чорноглазівська 17, м. Харків, 61002, Україна

Анотація. Досліджувались питання організації зон рекреації районного рівня для великих й найбільших міст. Ці зони відпочинку є одним із першорядних завдань у сучасних умовах фізичного та психологічного навантаження на населення міст. На цей час кількість населення більшості міст України достатньо зросла, а кількість місць відпочинку, особливо місцевого (районного типу) залишилась практично не змінною.

На підставі аналізу архітектурних та архітектурно-планувальних рішень сучасної міської забудови запропоновано для таких зон використовувати покрівлі багатоповерхівок, для чого провести їх озеленення.

Розглянуті рекреаційні зони на експлуатованих покрівлях, як елемент природоінтегрованої архітектури. Досліджено питання експлуатації плоских покрівель, використання їх у якості рекреаційних зон, саду із чагарниками чи навіть деревами, альтанками, майданчиками для відпочинку, теплицями чи зимовими садами.

Для створення якісних умов росту рослин на покрівлях, створення зелених зон (зимових садів, теплиць, оранжерей тощо) було запропоновано використовувати низькопотенційну теплоту вентиляційних викидів. Для цього було розглянуто використання, як безпосередньо теплоти вентиляційних викидів (для прогріву ґрунту), так й використання систем з проміжним теплоносієм, наприклад, з тепловими трубами для підігріву, наприклад, води для поливу рослин.

Розглянуто деякі проблеми утилізації низькопотенційної теплоти у системах з природним спонуканням руху витяжного повітря та виявлено шляхи для рішення нагальних проблем у цьому напрямку.

Для збільшення температурного потенціалу вентиляційних викидів, можливості використання викидів з кухонної зони та зони санітарних вузлів, запропоновано використання теплових насосів, які можуть збільшувати тепловий потенціал вентиляційних викидів. Запропоновано схему установки для підвищення температурного потенціалу вентиляційних викидів. Розглянуто її позитивні сторони, та недоліки.

Ключові слова: природоінтегрована архітектура, рекреаційна зона, плоска покрівля, зелена покрівля, використання низькопотенційної теплоти.

Стаття надійшла до редакції 26.05.2025

Стаття прийнята до друку 23.07.2025

Дата публікації статті 24.09.2025

[This work by](#) © 2025 by [Shushliakov D.O., Shushliakova O.S.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

**НЕЛІНІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБПИРАННЯ
ПЕРФОРОВАНИХ БАЛОК НА ОГОЛОВКИ КОЛОН**¹**Безнюк Л.І.**, аспірант,

l.i.bezniuk@nuwm.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6703-5062

¹**Романюк Є.В.**, аспірант,

e.v.romaniuk@nuwm.edu.ua, ORCID:0009-0005-6097-9788

¹**Романюк В.В.**, к.т.н., доцент,

v.v.romaniuk@nuwm.edu.ua, ORCID:0000-0002-2539-4654

¹**Супрунюк В.В.**, к.т.н., доцент,

v.v.supruniuk@nuwm.edu.ua, ORCID:0000-0001-9534-4460

¹**Зятюк Ю.Ю.**, к.т.н., доцент,

y.y.ziatiuk@nuwm.edu.ua, ORCID:0000-0003-3831-6599

¹*Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33000, Україна*

Анотація. Розглянуто можливість застосування програмного комплексу LIRA-FEM для нелінійного моделювання дійсної розрахункової схеми та фактичної роботи двотаврової нерозрізної перфорованої балки у місці обпирання її на горизонтальну плиту оголовка колони. Бібліотека скінченних елементів дозволяє моделювати роботу різних типів конструкцій елементами різної конфігурації, а також використовувати спеціальні елементи для моделювання в'язей у вузлових поєднаннях. Нелінійний розрахунок дозволяє виконати моделювання фактичної роботи конструкції, у якій враховано дійсне обпирання балки на колону; кріплення балки до оголовка колони болтами; заздалегідь прикладене зусилля натягу болтів, а також задано діаграму роботи сталі за дії статичного навантаження. Розроблено методику нелінійного розрахунку системи «балка-колона» та представлено етапи моделювання, починаючи зі створення нової задачі і закінчуючи розширеним аналізом отриманих результатів у розрахункових перерізах і точках конструкцій. Детально розглянуто моделювання спільної роботи балки з колоною з урахуванням реальної роботи болтів у з'єднаннях залежно від зусиль їх попереднього натягу. Сформульовано завдання для виконання нелінійного розрахунку металевих перфорованих двопробольотних нерозрізних балок з урахуванням пластичної деформації матеріалу, що має на меті визначення граничного навантаження та характеру втрати стійкості. У задачах фізичної та геометричної нелінійності розрахунки виконуються з використанням ітераційного та крокового методів. Виконано моделювання нелінійних навантажень, що представляє собою розширений рівень аналізу конструкцій, який дозволяє врахувати фізичну або геометричну нелінійність поведінки матеріалу або форми конструкції за дії значних навантажень. У лінійному навантаженні припускається, що воно прикладається поступово і матеріал реагує пропорційно, а у нелінійному аналізі матеріал може змінювати свою жорсткість за дії навантаження, у ньому відбуваються пластичні деформації, а також може враховуватись руйнування матеріалу.

Ключові слова: нерозрізна перфорована балка, проміжна опора, плита, оголовок колони, переріз, напруження, деформація, несуча здатність, програмний комплекс.

Вступ. Як відомо, розрахунок будівельних конструкцій з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) ґрунтується на представленні пружних систем у вигляді набору елементів з кінцевим числом ступенів свободи, які з'єднуються між собою у вузлових точках (вузлах). Тобто метод скінченних елементів заснований на представленні суцільного тіла у вигляді сукупності окремих скінченних елементів, що взаємодіють між собою в кінцевому

числі точок, які в МСЕ прийнято називати вузлами [1, 2]. Таке представлення заданої системи призводить до повної формалізації всіх етапів розрахунку, причому загальний підхід до вирішення конкретних завдань є єдиним як для стержневих систем, так і для пластин, оболонок, об'ємних тіл тощо [1, 2].

Метод скінченних елементів покладено в основу програмного комплексу для статичного та конструктивного розрахунків LIRA-FEM, у якому він реалізований у формі переміщень, тобто він застосовується для випадків, коли вирішальною шуканою функцією є переміщення. Це обумовлено тим, що вибір розрахункової схеми для МСЕ в переміщеннях легко піддається алгоритмізації, а практичне використання МСЕ неможливе без застосування сучасних комп'ютерів [1, 2].

Бібліотека скінченних елементів (БСЕ) містить елементи, що моделюють роботу різних типів конструкцій: елементи стержнів; чотирикутні та трикутні елементи плоскої задачі; плити; оболонки; елементи просторової задачі – тетраедр, паралелепіпед, тригранна призма. Крім того, у БСЕ є різні спеціальні елементи, що моделюють в'язь певної жорсткості, пружну податливість між вузлами, елементи, що задаються чисельною матрицею жорсткості [1, 2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Раніше здебільшого виконувався аналіз лише лінійних задач, тобто задач, в яких залежності між зовнішніми силами (внутрішніми напруженнями), що прикладені до конструкції (що виникають у поперечних перерізах від дії зовнішнього навантаження), та деформаціями її точок прийнято лінійними, а в основу фізичних рівнянь покладено узагальнений закон Гука (табл. 1). Але насправді це далеко не завжди відповідає реальній роботі конкретної конструкції в цілому або її окремих елементів (табл. 2).

Таблиця 1 – Характеристика та класифікація основних типів задач

| Лінійні, в яких | Типи задач | | |
|---|---|---|---|
| | Нелінійні | | |
| | фізично, в яких | геометрично, в яких | конструктивно, в яких |
| – закон Гука зберігається на всій ділянці роботи конструкції; – спостерігаються малі деформації; – в основу покладено принцип незалежності дії сил. | – закон Гука не зберігається на всій ділянці роботи конструкції; – необхідно враховувати пластичність та повзучість матеріалу. | – під час розрахунку конструкцій виникають великі деформації. | – відбувається зміна конструктивної схеми в процесі навантаження. |

Таблиця 2 – Загальні порівняння лінійного та нелінійного розрахунків

| Показник | Лінійні задачі | Нелінійні задачі |
|--|---|---|
| Властивості матеріалу | Лінійні пружні властивості, які визначаються за формулами опору матеріалів. | Нелінійні властивості, які часто невідомі та потребують проведення додаткових експериментальних досліджень. |
| Граничні умови | Під час розрахунку залишаються постійними. | Можуть змінюватися (наприклад, змінюється площа контакту обпирання балки). |
| Послідовність прикладання навантаження | Не суттєвий, не впливає на розрахунок | Стан досліджуваного зразка конструкції залежить від схеми навантаження. |
| Величина переміщення | Зміни геометрії через деформації вважаються малими і тому їх не враховують під час перевірки рівноваги. | Перевірка рівноваги враховує деформований стан конструкції. |

Фізична нелінійність проявляється у разі виникнення пластичних деформацій, тобто у разі урахування в роботі криволінійної ділянки діаграми «напруження-деформації», іншими словами – урахування стадії самозміцнення сталі.

У фізичних нелінійних задачах відсутня лінійна залежність між напруженнями та деформаціями. Матеріали конструкції підпорядковуються нелінійному закону деформування. Причому закон деформування конструкції може бути як симетричним, так і несиметричним з різними границями міцності за розтягу та стиску.

У разі розв'язання задач, що моделюють пружно-пластичну поведінку матеріалу, описану діаграмою Прандтля, використовується кроково-ітераційний метод.

Нелінійний процесор реалізує кілька методів для вирішення нелінійних задач різних типів:

- кроковий метод (рис. 1, а), як правило, застосовується для вирішення задач фізичної та геометричної нелінійності [2];
- метод січних або метод Біргера (рис. 1, б), як правило, застосовується для вирішення фізично нелінійних задач у режимі «інженерна нелінійність» [2];
- ітераційний метод або спрощений метод Ньютона (рис. 1, в) застосовується для вирішення задач конструктивної нелінійності (односторонні в'язі) [2].

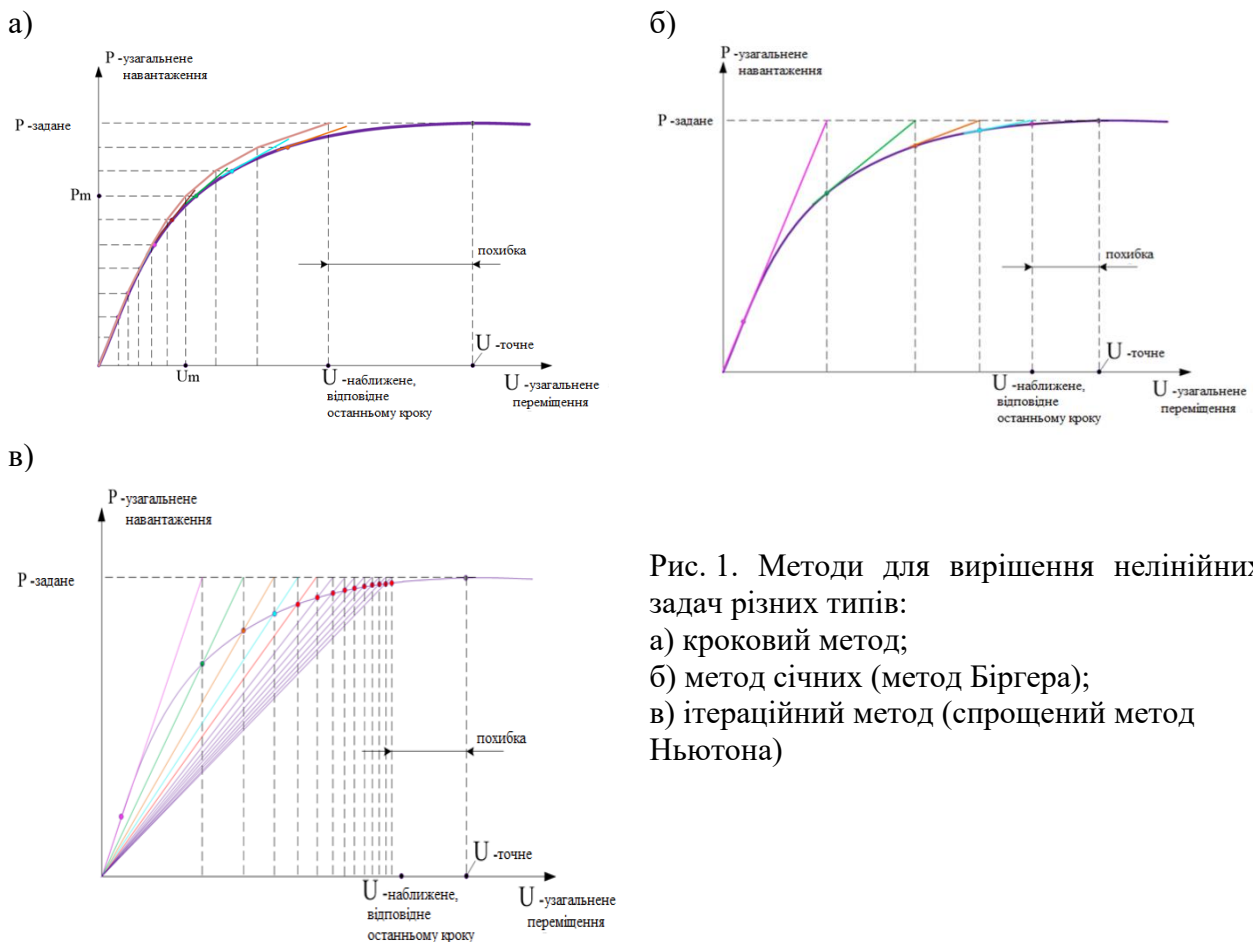


Рис. 1. Методи для вирішення нелінійних задач різних типів:
 а) кроковий метод;
 б) метод січних (метод Біргера);
 в) ітераційний метод (спрощений метод Ньютона)

Кроковий процесор дозволяє комбінувати лінійні та нелінійні скінченні елементи. Розрахунок за суперелементною схемою допускається, якщо нелінійні елементи присутні лише в основній схемі. На кожному кроці виконується оцінка напружено-деформованого стану. У програмному комплексі LIRA-FEM можна дізнатися результат розрахунку у розділі «Відомості про стан матеріалів», де наведено інформацію про розвиток або досягнення граничних станів, утворення пластичних шарнірів чи настання руйнування.

Мета та завдання. Виконати моделювання, статичний та конструктивний розрахунки запропонованих авторами типів проміжних опор нерозрізних перфорованих балок з різними

геометричними параметрами з урахуванням лінійного та нелінійного формулювання задач.

Методи досліджень. Аналіз літературних джерел, що присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням перфорованих конструкцій, а також використання методу скінченних елементів, реалізованого у програмному комплексі LIRA-FEM.

Результати досліджень. Розрахунку та експериментально-теоретичним дослідженням перфорованих елементів присвячено роботи [3-9], у яких розглянуто напружено-деформований стан конструкцій за дії зосередженого та рівномірно розподіленого погонного навантаження. Також розглянуто вплив жорсткості вузлових елементів на перерозподіл в них зусиль зокрема та на несучу здатність конструкцій у цілому [10-15].

Нелінійний розрахунок дозволяє виконати моделювання фактичної роботи конструкції, у якій враховано дійсне обпирання балки на колону; кріплення балки до оголовка колони болтами; заздалегідь прикладене зусилля натягу болтів, а також задано діаграму роботи сталі за дії статичного навантаження.

Моделювання розрахункової схеми нерозрізної перфорованої балки двотаврового перерізу (рис. 2) у місці обпирання на оголовок колони виконується у кілька етапів.

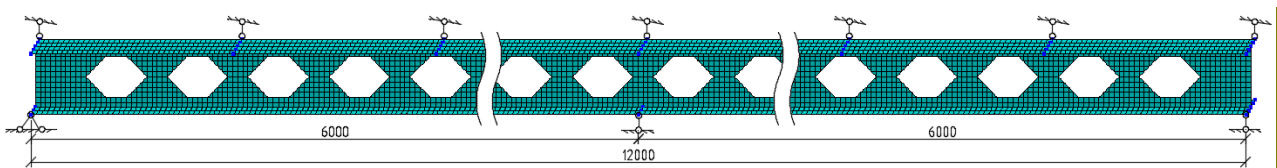


Рис. 2. Модель нерозрізної перфорованої балки в ПК LIRA-FEM

1-й етап – «Створення нової задачі».

1. Для створення нової задачі необхідно відкрити меню програми LIRA-FEM і обрати пункт Новий (створити новий документ).

2. У діалоговому вікні обрати ознаки схеми 5 – Шість ступенів свободи у вузлі: X , Y , Z , U_x , U_y , U_z . З цією ознакою схеми можна виконувати розрахунок просторових каркасів, оболонок, допускається включення об'ємних тіл, урахування пружної основи тощо.

2-й етап – «Створення геометричної схеми».

Моделювання сітки скінченних елементів двотаврів виконано по осьових лініях полиці та стінки за допомогою пластин (рис. 3), причому скінченні елементи біля шестикутних отворів сформовано три та чотиривузловими пластинами. Прийняті розміри та форми скінченних елементів дозволяють отримати високу точність розрахунку. Після створення геометричної схеми обов'язково необхідно виконати «Упаковку схеми». Наступним важливим моментом є співврівнювання власних місцевих осей пластин з глобальними осями моделі.

3-й етап – «Формулювання граничних умов».

Кріплення кінців перфорованої двопрольотної балки з однаковими за величиною прольотами $l = 6$ м прийнято таким: крайня опора зліва – шарнірно нерухома; крайня опора справа – шарнірно рухома; проміжна опора – шарнірно рухома у вигляді примикаючого шарніра. Для кріплення балки з площини дії навантаження використано поперечні елементи, які розміщено по верхніх поясах двотаврових профілів з кроком 1 м.

4-й етап – «Моделювання спільної роботи балки з колоною».

Моделювання оголовка колони виконується за допомогою пластин. З огляду на конструктивні вимоги проектування горизонтальних плит оголовків колон її товщину прийнято 20 мм. Розміри скінченних елементів оголовка залежать від розмірів поділу полиці перфорованої двотаврової балки на скінченні елементи.

Для моделювання спільної роботи балки та колони застосовується кінцевий двовузловий елемент односторонньої пружної в'язі з урахуванням тертя між вузлами. Цей KE призначений для моделювання ковзання в односторонній в'язі. Напрямок в'язі встановлюється відповідно до координат вузлів, що описують даний KE, і збігається з поздовжньою віссю $X1$.

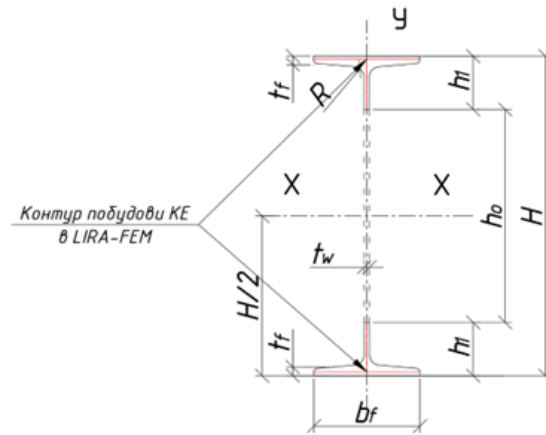


Рис. 3. Схема побудови скінченних елементів в ПК LIRA-FEM

З'єднання балки з колоною реалізується за допомогою стержневих елементів, моделювання яких виконується за допомогою функції «Переміщення твірної».

Визначення осьової жорсткості на стиск здійснюється за такою методикою:

1) визначається переміщення за дії $F = 1$ т :

$$\delta = (F l) / (E A), \quad (1)$$

де $F = 1$ т – одиничне навантаження;

l – розрахункова довжина кінцевого елемента, яка дорівнює сумі товщини плити оголовка і відстані до середини товщини полиці двотавра балки;

E – модуль пружності сталі;

A – робоча площа КЕ, мм².

2) визначається жорсткість на стиск:

$$C = 1 / \delta. \quad (2)$$

Результати розрахунків наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунків

| №№ профілів | Розмір плити оголовка колони в плані, мм | Розміри скінченних елементів зони контакту плити оголовка та полиці двотавра, мм | | A, мм ² | Розрахункова довжина кінцевого елемента l, мм | Переміщення δ , м/т | Значення осьової жорсткості на стиск, C, т/м | Коефіцієнт тертя, μ |
|-------------|--|--|-------|--------------------|---|----------------------------|--|-------------------------|
| | | 25 | 25 | | | | | |
| 20 | 200×200 | 25 | 25 | 625 | 24,2 | $1,88 \times 10^{-6}$ | 532 024 | 0,25 |
| 30 | 200×200 | 25 | 33,75 | 843,75 | 25,1 | $1,444 \times 10^{-6}$ | 692 480 | 0,25 |
| 40 | 200×200 | 25 | 26 | 650 | 26,5 | $1,979 \times 10^{-6}$ | 505 283 | 0,25 |
| 50 | 250×200 | 50 | 42,5 | 2125 | 27,6 | $0,63 \times 10^{-6}$ | 1 586 020 | 0,25 |
| 60 | 250×200 | 50 | 50 | 2500 | 28,2 | $0,548 \times 10^{-6}$ | 1 826 241 | 0,25 |
| | | | 45 | 2250 | | $0,608 \times 10^{-6}$ | 1 643 617 | |

Примітка. Значення коефіцієнтів тертя обирається залежно від способу обробки поверхні металу (без обробки металу 0,25).

5-й етап – «Моделювання болтів та завдання зусилля попереднього натягу».

Болти у вузлах моделюються за допомогою КЕ «Універсальний просторовий стержневий КЕ». Їх розміщення наведено у 2-му стовпчику табл. 4, а довжина визначається відстанню від середньої осі полиці балки до нижньої площини плити оголовка колони.

Задати зусилля попереднього натягу у програмному комплексі LIRA-FEM можна за допомогою температурного навантаження. Для обчислення температури використаний алгоритм розрахунку:

1) несуча здатність одного болта:

$$N_{bt} = A_{bn} R_{bt}, \quad (3)$$

де R_{bt} – розрахунковий опір болта розтягу, величина якого залежить від класу міцності болта (для болтів класу міцності 5.6 згідно з табл. Д.4 [3] $R_{bt} = 225$ МПа);

2) коефіцієнт температурного розширення сталі $\alpha = 0,0000133$ 1/°C;

3) видовження болта прийнятого діаметру d (мм) та обчисленої довжини l (мм) за дії попереднього натягу поздовжньою силою N (т):

$$\Delta l = (N l) / (E A_{bn}); \quad (4)$$

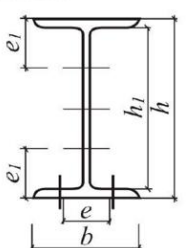
4) температурне навантаження на болт:

$$T^\circ = -\Delta l / (l \alpha). \quad (5)$$

Результати розрахунків наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Результати розрахунків

| №№ профілів | e , мм | d_{max} , мм | d_b , мм | l , мм | N_{bt} , т | N , т | A_b , мм ² | A_{bn} , мм ² | Δl , мм | t° |
|-------------|----------|----------------|-----------------|----------|----------------------|---------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 20 | 55 | 17 | 16 | 28,4 | 5,89 | 3 | 201 | 157 | 0,0206 | -54,48 |
| 30 | 70 | 23 | $\frac{16}{20}$ | 30,2 | $\frac{5,89}{9,19}$ | $\frac{3}{5}$ | $\frac{201}{314}$ | 157 245 | $\frac{0,0219}{0,0365}$ | $\frac{-54,48}{-90,79}$ |
| 40 | 80 | 23 | $\frac{16}{20}$ | 33,0 | $\frac{5,89}{9,19}$ | $\frac{3}{5}$ | $\frac{201}{314}$ | 157 245 | $\frac{0,0239}{0,0398}$ | $\frac{-54,48}{-90,79}$ |
| 50 | 100 | 23 | $\frac{16}{20}$ | 35,2 | $\frac{5,89}{9,19}$ | $\frac{3}{5}$ | $\frac{201}{314}$ | 157 245 | $\frac{0,0255}{0,0425}$ | $\frac{-54,48}{-90,79}$ |
| 60 | 110 | 25 | $\frac{20}{24}$ | 37,8 | $\frac{9,19}{13,20}$ | $\frac{5}{7}$ | $\frac{314}{452}$ | 245 352 | $\frac{0,0292}{0,0409}$ | $\frac{-58,12}{-81,37}$ |



e – відстань; d_{max} – максимально можливий діаметр отвору в полиці;
 d_b – діаметр болта; l – розрахункова довжина болта;
 N_{bt} – розрахункове зусилля на розтяг одного болта; N – сила натягу болта; A_b – розрахункова площа поперечного перерізу стержня болта;
 A_{bn} – площа поперечного перерізу стержня болта нетто у місці нарізки;
 Δl – видовження болта; t° – температурне навантаження на болт.

6-й етап – «Постановка задачі нелінійного розрахунку сталевих елементів».

Виконання нелінійного розрахунку металевих перфорованих двопрольотних нерозрізних балок з урахуванням пластичної деформації матеріалу має на меті визначення граничного навантаження та характеру втрати стійкості.

Пружні деформації:

$$\varepsilon_{np} = R_y / E = 230 / 206000 = 0,00116505 \quad (6)$$

Відносні деформації розриву зразка у середньому становлять $\varepsilon_{роз} = 0,2\%$.

LIRA-FEM підтримує застосування різних законів нелінійного деформування матеріалів, призначених для задання характеристик фізичної нелінійності матеріалів конструкції. Для розрахунку металевих елементів використовується «Кусково-лінійний закон деформування».

В таблиці закону, зазначають такі параметри:

- деформація в i -тій проміжній точці ε_i ;
- напруження в i -тій проміжній точці σ_i .

Кількість точок не обмежується. Характеристики гілки стиску є від’ємними числами. Якщо значення деформації, отриманої за результати розрахунку, виходить за межі заданого закону, то моделюється вимкнення матеріалу (тобто приймається $E_i = 1$) елементарної площини з роботи перерізу. Необхідно зауважити, що горизонтальні ділянки задавати неможна [2]. У програмному комплексі використано діаграму деформування, відому як діаграма Прандтля (рис. 4).

Використано такі кінцеві елементи: «Універсальний трикутний KE оболонки», «Універсальний чотирикутний KE оболонки», які призначені для розрахунку міцності тонких положистих оболонок (плит, балок-стінок); «Фізично нелінійний універсальний трикутний KE оболонки», «Фізично нелінійний універсальний чотирикутний KE оболонки», які призначені для визначення напружено-деформованого стану тонких положистих оболонок. Причому оболонка розглядається як біматеріальна система з ізотропними фізично-нелінійними матеріалами.

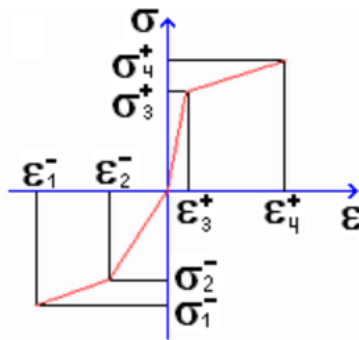


Рис. 4. Кусково-лінійний закон деформування

У задачах фізичної та геометричної нелінійності розрахунки виконуються з використанням ітераційного та крокового методів.

Кроковий метод полягає у поступовому прикладанні навантаження або зміни зовнішніх умов шляхом поділу його на окремі навантажувальні кроки (етапи). Це дозволяє враховувати зміну жорсткісних характеристик елементів конструкцій на кожному етапі.

Ітераційний метод використовується на кожному кроці навантаження з метою уточнення рішення шляхом багатократного повторення обчислень до досягнення збіжності (заданої точності). Даний метод забезпечує точне урахування фізичної нелінійності матеріалів конструкції.

Порівняння методів наведено у табл. 5.

Таблиця 5 – Порівняння методів

| Порівняльна таблиця методів | | |
|-----------------------------|--|--|
| Критерій | Кроковий | Ітераційний |
| Приклад застосування | Аналіз процесу навантаження конструкції | Визначення напружено-деформованого стану у разі зміни властивостей |
| Використання | Геометрична нелінійність, руйнування, пластичність | Фізична нелінійність, змінна жорсткість |
| Призначення | Поступове прикладання навантаження | Уточнення розв’язку на кожному кроці |
| Принцип роботи | Навантаження ділиться на кроки | Повторні обчислення всередині одного кроку |

7-й етап – «Моделювання лінійних та нелінійних навантажень конструкції».

Навантаження прикладено до верхнього поясу двотаврової перфорованої нерозрізної балки у кН/м^2 , які обчислюють на основі рівномірно розподілених погонних навантажень. Перелік навантажень, які застосовуються в моделі, наведено у табл. 6, а також застосовуються навантаження з коефіцієнтами 1,5 та 2,0.

Таблиця 6 – Розрахункові погонні навантаження

| №№ профілів | Розрахункові погонні навантаження | | | |
|-------------|------------------------------------|---------------------|----------------|------------------------------------|
| | за граничними станами першої групи | | | за граничними станами другої групи |
| | $q_{Qmax},$ кН/м | $q_{Mmax},$ кН/м | $q_l,$ кН/м | $q_{II},$ кН/м |
| 20 | 15,5 | 9,73 | 9,73 | 12,53 |
| 30 | 28,9 | 24,91 | 24,91 | 48,23 |
| 40 | 48,92 | 51,22 | 48,92 | 129,85 |
| 50 | 72,84 | 86,17 | 72,84 | 270,63 |
| 60 | 102,81 | 138,83 | 102,81 | 516,41 |

Моделювання нелінійних завантажень – це розширений рівень аналізу конструкцій, який дозволяє врахувати фізичну або геометричну нелінійність поведінки матеріалу або форми конструкції за дії значних навантажень.

У класичному (лінійному) завантаженні припускається, що навантаження прикладається поступово і матеріал реагує пропорційно. У нелінійному аналізі матеріал може змінювати свою жорсткість під навантаженням; відбуваються пластичні деформації; може враховуватися руйнування матеріалу.

8-й етап – «Розрахунок схеми».

Задача запускається на розрахунок «Виконати повний розрахунок» та перевіряється протокол розрахунку.

Для виконання розрахунків конструкції на руйнування необхідно розрахувати «Схему процесором попередніх років» і також перевірити протокол розрахунку.

9-й етап – «Аналіз та розширений аналіз».

У розширеному аналізі можна дізнатись характер руйнування конструкції. Для обраного шару пластини (верхній, середній, нижній) будується картина руйнування, тобто зображується напрям тріщин у вигляді відрізків. Відображення відбувається лише за результатами розрахунку фізичної нелінійності конструкцій. Для відображення карти руйнування необхідно виконати розрахунок схеми процесором попередніх версій.

Висновки:

1. Розроблено методику розрахунку та визначення напружено-деформованого стану двопрольотної нерозрізної перфорованої балки у місці її опирання на проміжну опору у програмному комплексі LIRA-FEM для нелінійного моделювання дійсної розрахункової схеми балки та її фактичної роботи.

2. Розрахунок задач у лінійній інтерпретації, тобто задач, в яких залежності між внутрішніми напруженнями, що виникають у поперечних перерізах балки від дії певних зусиль, та деформаціями її розрахункових точок прийнято лінійними, далеко не завжди відповідає реальній роботі конкретної конструкції в цілому або її окремих елементів.

3. Нелінійний розрахунок дозволяє виконати моделювання фактичної роботи конструкції, у якій враховано: дійсне опирання балки на колону з урахуванням конкретної конструктивної схеми; кріплення балки до плити оголовка колони болтами; заздалегідь прикладене зусилля натягу болтів певної величини; обрану діаграму роботи сталі за дії статичного навантаження.

4. Детально розроблено методику нелінійного розрахунку системи «балка-колона» та представлено етапи моделювання, починаючи зі створення нової задачі і закінчуючи розширеним аналізом отриманих результатів з використанням, залежно від конкретних умов і задач розрахунку, мозаїки або ізополів у розрахункових перерізах і точках конструкцій.

5. Для розв'язання задач фізичної та геометричної нелінійності розглянуто можливість використання ітераційного та крокового методів розрахунків, кожний з яких враховує низку критеріїв і має свою раціональну область використання.

Література

1. Програма для розрахунку за методом скінченних елементів. URL: <https://www.liraland.ua/solutions/functionality/fem.php>.

2. Розрахунок конструкцій у нелінійній постановці ЛІРА-САПР. URL: <https://help.liraland.com/uk-ua/high-technology-innovations/nonlinearity-in-lira-sapr.html>.

3. ДБН В.2.6 – 198: 2014. Сталеві конструкції. Норми проектування [Чинний від 2015-01-01]. Київ: Мінрегіон України, 2014. 198 с. (Державні будівельні норми України).

4. Volodymyr Romaniuk, Volodymyr Supruniuk, Leonid Bezniuk, Oleksandr Kononchuk, Olga Meshcheryakova, Andrii Sorochak. Features of the work of continuous perforated beams near intermediate supports. *Procedia Structural Integrity*. Volume 59, 2024, P. 471–478. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.067>.

5. Volodymyr Romaniuk, Volodymyr Supruniuk, Leonid Bezniuk, Oleksandr Kononchuk, Olga Meshcheryakova, Andrii Sorochak. Experimental studies of a steel rafter arch with a perforated upper band. *Procedia Structural Integrity*. Volume 59, 2024, P. 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.068>.

6. Романюк В.В., Супрунюк В.В. Експериментальні дослідження прольотних конструкцій з перфорованих елементів за складного напружено-деформованого стану. *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник*. К.: КНУБА, 2019. Випуск 103. С. 189–200.

7. Романюк В.В., Супрунюк В.В. Міцність та деформативність перфорованих елементів сталеві арки: монографія. Рівне: НУВГП, 2013. 106 с.

8. Романюк В.В., Супрунюк В.В. Особливості розрахунку прольотних конструкцій з перфорованих елементів за складного напружено-деформованого стану. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Випуск 175. С. 98 – 108.

9. Романюк В.В., Василенко В.Б., Супрунюк В.В. Несуча здатність перфорованих прогонів Z-подібного профілю за косоного згину: монографія. Рівне: НУВГП, 2017. 206 с.

10. Романюк В.В., Супрунюк В.В. Вплив жорсткості фланцевого гребеневого вузла двохшарнірної арки на перерозподіл зусиль в її елементах. *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник*. К.: КНУБА, 2021. Випуск 106. С. 236–246.

11. Jia Wang, Brian Uy, Huu-Tai Thai, Dongxu Li. Behaviour and design of demountable beam-to-column composite bolted joint with extended end-plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018. Volume 144, P. 221–235.

12. Xue-Chun Liu, Fu-Yuan Cui, Zi-Qin Jiang, Xiao-Qing Wang. Tension–bend–shear capacity of bolted-flange connection for square steel tube column. *Engineering Structures*, 2019. Volume 20115, 109798.

13. Romaniuk V., Supruniuk V. Influence of Flexibility of Bolted Joints on Rigidity of the Hingeless Frame. *Proceedings of EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 100. P. 371–377. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_45.

14. Volodymyr Romaniuk, Volodymyr Supruniuk, Leonid Bezniuk, Mykhailo Fursovych, Yuriy Ziatiuk. Determination of rigidity of node bolt joints. *AIP Conference Proceedings*, 2023. Volume 2678, Issue 1. 020016. <https://doi.org/10.1063/5.0119015>.

15. Romaniuk V.V., Supruniuk V.V., Bezniuk L.I., Misyuk T.Y. The Effect Of The Actual Stiffness Of Bolted Hinged Joints On The Bearing Capacity Of The Elements. *Strength of Materials*

References

- [1] Prohrama dlia rozrakhunku za metodom skinchennykh elementiv. [Online]. Available: <https://www.liraland.ua/solutions/functionality/fem.php>. Accessed on: May 3, 2025.
- [2] Rozrakhunok konstruksiy u neliniyniy postanovtsi LIRA-SAPR. [Online]. Available: <https://help.liraland.com/uk-ua/high-technology-innovations/nonlinearity-in-lira-sapr.html>. Accessed on: May 3, 2025.
- [3] DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruksiyi. Normy proektuvannya. Kyiv: Minrehion Ukrayiny, 2014.
- [4] V. Romaniuk, L. Bezniuk, V. Supruniuk, O. Kononchuk, O. Meshcheryakova, A. Sorochak, "Features of the work of continuous perforated beams near intermediate supports", *Procedia Structural Integrity*, vol. 59, pp. 471-478, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.067>.
- [5] V. Romaniuk, L. Bezniuk, V. Supruniuk, O. Kononchuk, O. Meshcheryakova, A. Sorochak, "Experimental studies of a steel rafter arch with a perforated upper band", *Procedia Structural Integrity*, vol. 59, pp. 479-486, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.068>.
- [6] V.V. Romaniuk, V.V. Supruniuk, "Eksperymental'ni doslidzhenny aprot'otnykh konstruksiy z perforovanykh elementiv za skladnoho napruzhenno-deformovanoho stanu", *Opir materialiv i teoriya sporud*, vyp. 103, pp. 189-200, 2019.
- [7] V.V. Romaniuk, V.V. Supruniuk, *Mitsnist' ta deformatyvnist' perforovanykh elementiv stalevoyi arky*: monohrafiya. Rivne: NUVHP, 2013.
- [8] V.V. Romaniuk, V.V. Supruniuk, "Osoblyvosti rozrakhunku prol'otnykh konstruksiy z perforovanykh elementiv za skladnoho napruzhenno-deformovanoho stanu", *Zbirnyk naukovykh prats' Ukrayins'koho derzhavnogo universytetu zaliznychnoho transportu*, vypusk 175, pp. 98 – 108, 2018.
- [9] V.V. Romaniuk, V.B. Vasylenko, V.V. Supruniuk, *Nesucha zdatnist' perforovanykh prohoniv Z-podibnoho profilyu za kosoho zhyvu*: monohrafiya. Rivne: NUVHP, 2017.
- [10] V.V. Romaniuk, V.V. Supruniuk, "Vplyv zhorstkosti flantsevoho hrebenevoho vuzla dvosharnirnoyi arky na pererozpodil zusyl' v yiyi elementakh", vyp. 106, pp. 236-246, 2021.
- [11] Jia Wang, Brian Uy, Hui-Tai Thai, Dongxu Li, "Behaviour and design of demountable beam-to-column composite bolted joints with extended end-plates", *Journal of Constructional Steel Research*, volume 144, pp. 221–235, 2018.
- [12] Xue-Chun Liu, Fu-Yuan Cui, Zi-Qin Jiang, Xiao-Qing Wang, "Tension–bend–shear capacity of bolted-flange connection for square steel tube column", *Engineering Structures*, volume 20115, 109798, 2019.
- [13] V. Romaniuk, V. Supruniuk, "Influence of Flexibility of Bolted Joints on Rigidity of the Hingeless Frame", *Proceedings of EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 100, pp. 371–377, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_45.
- [14] V. Romaniuk, V. Supruniuk, L. Bezniuk, M. Fursovych, Y. Ziatyuk, "Determination of rigidity of node bolt joints", *AIP Conference Proceedings*, volume 2678, Issue 1, 020016, 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0119015>.
- [15] V.V. Romaniuk, V.V. Supruniuk, L.I. Bezniuk, T.Y. Misyuk, "The Effect Of The Actual Stiffness Of Bolted Hinged Joints On The Bearing Capacity Of The Elements", *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*, Issue 107, pp. 323 – 332. 2021. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.107.323-332>.

**NONLINEAR MODELING OF SUPPORTING
PERFORATED BEAMS ON COLUMN HEADS**

¹**Bezniuk L.I.**, postgraduate student,
l.i.bezniuk@nuwm.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6703-5062
¹**Romaniuk Y.V.**, postgraduate student,
e.v.romaniuk@nuwm.edu.ua, ORCID: 0009-0005-6097-9788
¹**Romaniuk V.V.**, PhD, Assistant Professor,
v.v.romaniuk@nuwm.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2539-4654
¹**Supruniuk V.V.**, PhD, Assistant Professor,
v.v.supruniuk@nuwm.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9534-4460
¹**Ziatiuk Y.Y.**, PhD, Assistant Professor,
y.y.ziatiuk@nuwm.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3831-6599
¹*National University of Water and Environmental Engineering*
11, Soborna str., Rivne, 33000, Ukraine

Abstract. The possibility of using the LIRA-FEM software package for nonlinear modeling of the actual design scheme and actual operation of an I-beam continuous perforated beam at the point of its support on the horizontal column head plate is considered. The finite element library allows modelling the operation of various types of structures with elements of various configurations, as well as use special elements for modeling joints in nodal connections. Nonlinear calculation allows modeling the actual operation of the structure, which takes into account the actual support of the beam on the column; fastening the beam to the column head with bolts; a pre-applied bolt tension force, and a given diagram of the steel operation under static loading. A method for nonlinear calculation of the beam-column system has been developed and the modeling stages are presented, starting with the creation of a new problem and ending with an extended analysis of the results obtained in the design sections and points of the structures. The modeling of the joint operation of a beam with a column is considered in detail, taking into account the real operation of bolts in the connections, depending on their pre-tensioning forces. A task has been formulated for performing nonlinear calculation of perforated metal double-span continuous beams taking into account plastic deformation of the material, which aims to determine the ultimate load and the nature of the loss of stability. In problems of physical and geometric nonlinearity, calculations are performed using iterative and stepwise methods. Nonlinear load modeling was performed, which is an advanced level of structural analysis that allows taking into account the physical or geometric nonlinearity of the behavior of the material or shape of the structure under the action of significant loads. In linear loading, it is assumed that the load is applied gradually and the material responds proportionally. In nonlinear analysis, the material can change its stiffness under the action of the load, plastic deformation occurs in it, and material failure can also be taken into account.

Keywords: continuous perforated beam, intermediate support, slab, column head, cross-section, stress, deformation, bearing capacity, software package.

Стаття надійшла до редакції 8.06.2025

Стаття прийнята до друку 20.06.2025

Дата публікації статті 24.09.2025

This work by © 2025 by Безнюк Л.І., Романюк Є.В., Романюк В.В., Супрунюк В.В., Зятюк Ю.Ю.
is licensed under CC BY 4.0

**ЛЕГКІ КЛЕЄФАНЕРНІ ПАНЕЛІ ІЗ ЗІГНУТИМИ Х-ПОДІБНИМИ
ПОВЗДОВЖНИМИ РЕБРАМИ ЖОРСТКОСТІ**

¹**Бідаков А.М.**, д.т.н., доцент,
bidakov@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6394-2247

¹**Пустовойтова О.М.**, к.т.н., доцент,
oksana_pustov@ukr.net, ORCID: 0009-0003-4774-6686

¹**Єфимович В.Ю.**, студент,
slavmovich@gmail.com, ORCID: 0009-0000-4159-2784

¹*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова*
17, вул. Черноголазівська, Харків, 61002, Україна

Анотація. Сучасний стан будівельної галузі в Україні з кожним роком збільшує відсоток будівель, що реалізуються з використанням деревини в новому будівництві, підхоплюючи тенденцію європейських країн, де деревина стає основним матеріалом при реалізації житлових та громадських будівель. Поверховість таких дерев'яних каркасів вже сягає 20-30 поверхів з несучими каркасними конструкціями з клеєного бруса та CLT-панелей. Останні є новим інноваційним панельним матеріалом, що дозволяє легко та швидко збирати будівлі різної товщини, але їх ефективність значно знижується для прольотів понад 6 м. Запропоновані фанерні легкі панелі або панелі PRX є рішенням проблеми простого покриття для збільшених прольотів покриттів та перекриттів завдяки інноваційному підходу з використанням гнутих поздовжніх ребер панелей, для стійкості яких не потрібне розташування поперечних ребер. Проблема цього типу панелей полягає у визначенні відповідності Х-подібних фанерних ребер на основі досліджень з розробкою спрощеного методу розрахунку як системи факторів або коефіцієнтів, що коригують традиційні алгоритми розрахунку подібних тонкостінних конструкцій, що працюють на згин. У запропонованій розробці легких та одночасно жорстких панелей основний акцент було зроблено на простоті та технологічності виробництва панелей, спираючись на сучасне автоматизоване виробниче обладнання. Панелі PRX можуть бути використані як елементи самонесучих стін.

Метою розробки інноваційних легких фанерних панелей було створення нового технологічного рішення для перекриттів та дахів будівель для прольотів 7-20 м. Ідея легких та жорстких панелей з Х-подібними криволінійними стінками або ребрами є продовженням досліджень балок з такими стінами, де ефективність криволінійної форми фанерних стін показала певні переваги порівняно з класичними двотавровими балками з фанерними стінками. Запропоноване рішення обшивки панелей дозволяє швидко збирати будівлі різного призначення та розміщувати ізоляцію та деякі комунікації всередині панелей. Для уточнення параметрів міцності, деформативності та визначення характеру руйнувань панелей були проведені натурні статичні випробування натурального зразка, а також виконані числові дослідження в аналітичних програмних пакетах з акцентом на поведінку та податливість криволінійних фанерних стін на різних етапах навантаження панелей. На основі отриманих експериментальних та числових даних запропоновано методика, яка враховує не лише геометрію поперечного перерізу, але й його випотіння фанерними стінками або поздовжніми ребрами панелей PRX.

Ключові слова: клеєфанерні панелі, піддатливість, зігнуті ребра жорсткості, Х-подібні ребра, втрата стійкості, панелі покриття.

Вступ. Сучасний стан будівельної галузі в Україні з кожним роком збільшує відсоток будівель реалізованих з використанням деревини у новому будівництві, підхоплюючи тренд Європейських країн, де деревина стає основним матеріалом при реалізації житлових і громадських будівель. Поверховість таких дерев'яних каркасів вже сягає 20-30 поверхів з

несучими конструкціями каркасу із клеєної деревини та ПКД чи СЛТ панелей. Останні є новим інноваційним матеріалом панельного типу який дозволяє просто та швидко складати будівлі різних плануваль, але їх ефективність суттєво скорочується при прольотах більше 6м. Запропоновані клеєфанерні легкі панелі або ПРХ панелі є рішенням задачі простого покриття для збільшених прольотів покриттів і перекриттів завдяки інноваційному підходу з використанням зігнутих повздожніх ребер панелей для стійкості яких не потрібно влаштування поперечних ребер. Проблематика такого типу панелей складається у визначенні піддатливості Х-подібних фанерних ребер на основі досліджень з розробкою спрощеної методики розрахунку як системи факторів чи коефіцієнтів коригуючи традиційні алгоритми обчислень аналогічних тонкостінних конструкцій працюючих при згині.

У запропонованій розробці легких та одночасно жорстких панелях основний акцент був зроблений на простоту і технологічність виробництва панелей, спираючись на сучасні автоматизовані виробничі устаткування. ПРХ панелі можуть використовуватись як елементи самонесучих стін.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Популяризація та активні дослідження панельних дерев'яних конструкцій у вітчизняній практиці відноситься до періоду 60-90х років минулого століття. Панельні рішення як конструктивні елементи покриттів і перекриттів відомі у індустріальних та типових рішеннях житлових каркасних будівель. Загальна типологія панельних конструкцій поділяється на варіанти в залежності від поперечного перетину: коробчасті панелі і ребристі панелі в яких ребра є масивні і з'єднані відносно тонкими обшивками. Також існує рішення використання фанери у тонкостінних конструкціях як балки відповідно двотаврового типу та коробчастого типу. Система балок з тонкими стінками при блоковому компонуванні можливо розглядати як панель. Саме така аналогія дозволила перейти від ідеї блок з Х-подібною стінкою до панелей з Х-подібними стінками чи ребрами. Детальний розгляд роботи стінок різного радіусу кривини було досліджено у рамках дисертаційної роботи [1] ще у період 2011-2014 року. Конструкція балок з Х-подібними стінками захищена патентом на винахід у 2014 році [2], а конструкція ПРХ панелі із зігнутими фанерними стінками запатентована у 2023 році [3]. Близьким аналогом до запропонованих панелей є австрійські Кільштег панелі в основі яких є кілеподібна балка також із зігнутими стінками але дещо іншого характеру (рис. 1), і яка також у цей же період захищена патентом [2] у 2013 році. Дослідження щодо міцності і особливостей роботи Кільштег панелей представлені у роботах проф. Штудгартського університету S. Aicher [2].



Рис.1. Загальний вид Кільштег панелі [4-5]

Рекомендований діапазон використання Кільштег панелей сягає проліт 30м при висоті поперечного перерізу 800мм, де пояса панелі виконані з клеєної або цільної деревини товщиною 43-85мм зі стінками з ОСБ або фанери товщинами 4-12мм, згідно до технічного заключення [6] і технічних каталогів виробника [4-5]. Впровадження таких панелей реалізовано у десятках будівель, що підтверджує ефективність і об'єктивні переваги легких інноваційних рішень для покриттів будівель.

Попередні оціночні висновки щодо ПРХ панелей від розробників Кільштег панелей були позитивними у особистому спілкуванні, визнаючи що робота зігнутих ребер як циліндричної оболонки є більш вигідним ніж варіант пластини у випадку прямих ребер.

Мета та завдання. Нові конструктивні рішення будівельних конструкцій для впровадження у будівельну практику потребують наявності експериментальних і чисельних досліджень, а також їх критичний аналіз для створення і оптимізації параметрів промислового зразка, який включає розробку сортаменту конструктиву з геометричними параметрами складових. Перехід від промислового зразка до серійного потребує комплексного розгляду як сортаменту, методів спрощення технологічного процесу виробництва, які навіть можуть шкодити якості у певних діапазонах несучої здатності, але при цьому мати знижену собівартість. Такі кроки можливі лише після визначення слабких місць, чинників впливу на механічні характеристики панелі. Дослідження легких клеєфанерних ПРХ панелей із зігнутими фанерними стінками виконано як аналітично, так і чисельно через розгляд їх геометричних варіацій, а також розробка інженерного методу розрахунку ПКД панелей, що і стояло на меті виконаних досліджень та критичного аналізу отриманих даних. Існуючі аналоги для ПРХ панелей і методи розрахунку для тонкостінних систем використані у порівняльному аналізі при аналізі фактора зменшення міцності фанери при зсуві.

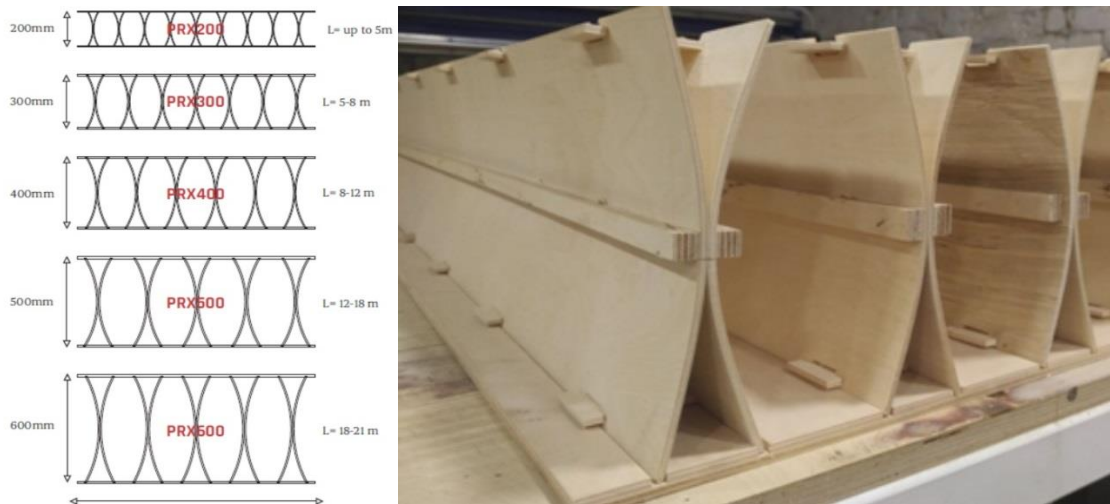
Матеріали та методика дослідження. Висока міцність фанери як листового матеріалу була визнана ще 100 років тому і вона знайшла своє використання не лише у будівельній сфері, а також у авіа будівництві періоду 40-х років у конструкції літаків ІЛ-2 у якості обшивок крил та корпусу. Робота фанери була у криволінійній геометрії та в умовах складного напруженого стану та динамічних навантажень. Масивність ПКД або CLT панелей сьогодні окреслює їх ефективність при певних умовах прольотів і навантажень, що спонукає до розробки нових легких конструктивів з великою жорсткістю та можливістю створювати будівельний підйом або вигин, що вкрай важливо для конструкцій прольотом від 12м. Технологія виготовлення ПРХ панелей базується на простому виготовленню складових у вигляді фрагментів панелі, які складаються з двох обшивок та зігнутих ребер (рис. 2). В подальшому виготовленні фрагменти панелі довжиною до 2,4м з'єднуються у панель заданої довжини певного перерізу, де вигин формується при стикуванні таких фрагментів на спеціальних стендах для укрупнюючої збірки на виробництві.

Фанерні обшивки панелі фрезеруються у повздовжньому напрямку для подальшого вклеювання у фрезеровані пази зігнутих стінок. Х-подібні ребра виготовляються шляхом скріплення двох фанерних частин у середині відносно їх ширини у повздовжньому напрямі з використанням степлерних скоб та фанерних рейок, щоб уникнути пробивання фанери стінок у місцях встановлення скоб. Вигин скріплених стінок виконується механічно і фіксується попередньо виготовленими пластинками у місцях пазів по краях ребер таким чином, щоб не заважали вклеюванню у фанерні обшивки. Ширина всіх панелей 1200мм виходячи з формату листів фанери, а відповідні товщини стінок та обшивок змінні в залежності від висоти перерізу (табл. 1). Клеєві системи для стикування Х-подібних стінок та обшивок виконується із застосуванням однокомпонентних клеїв без притискання. Торцеві ребра також влаштовуються на клеях на останній фазі виробництва.

Таблиця 1 – Геометричні параметри ПРХ панелей

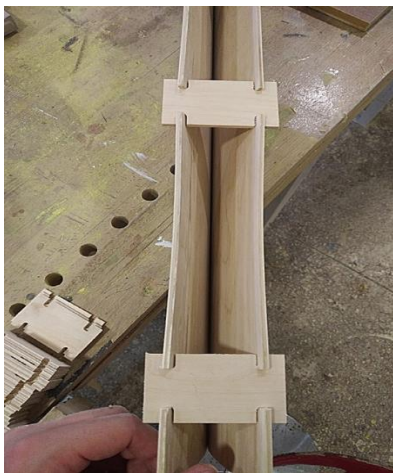
| Висота перерізу панелі, мм | Товщина нижньої обшивки, мм | Товщина верхньої обшивки, мм | Товщина стінок, мм | Радіус кривини стінок, мм | Співвідношення висоти стінки, до її товщини (h_w/b_w) | Макс. рекоменд. проліт панелі |
|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------|---------------------------|---|-------------------------------|
| 300 | 10 | 10 | 6 | 300 | 23,33 | 5-8 |
| 400 | 12 | 12 | 6 | 400 | 31,33 | 8-12 |
| 500 | 15 | 15 | 8 | 500 | 29,38 | 12-15 |
| 600 | 15 | 15 | 8 | 600 | 35,63 | 15-18 |
| 800 | 20 | 20 | 10 | 800 | 38 | 18-22 |

Матеріал фанери F25/E10 згідно до стандарту EN12369-2:2004 [7] та стандарту EN636:2012 [8].



а) загальний вид перерізів панелей

б) розташування ребер у обшивці панелі перед вклеюванням



в) розпірки між ребрами



г) загальний вид панелі з торцевими ребрами перед випробуванням



д) переріз панелі після випробувань

Рис. 2. Загальний вид PRX панелі та етапи виробництва

Спрощені методи інженерного розрахунку для зручності застосування PRX-панелей базуються на наближенні панелі як сукупність балок з X-подібними зігнутими стінками, що, в свою чергу, прирівнюється до балки з тонкими стінками, рис. 3. Метод розрахунку міцності верхньої та нижньої полиць балки залишається типовим для цього типу конструкцій, а X-подібні стінки потребують особливої уваги та врахування своєї зниженої міцності на зсув $f_{v,0,d}$ при розрахунку від сили $F_{v,w,Ed}$, яка, як правило, є максимальною в зоні опори для однопролітних шарнірно спертих балок.

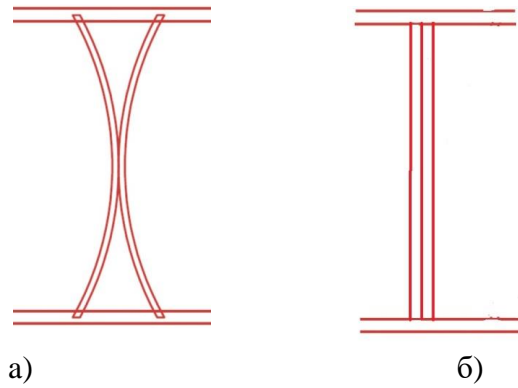


Рис. 3. Спрощення балок з X-подібними вигнутими стінками (а) як тонкостінної двотаврової балки (б)

Діючий Єврокод-5 [9] та нова його проектна редакція prEN 1995-1-1:2023 [10] визначає, що розрахунок поперечної сили слід виконувати залежно від співвідношення висоти стінки h_w до її товщини b_w (рівняння 1 та 3). Висота стиснутих та розтягнутих полиць балки позначена відповідно як $h_{f,t}$ та $h_{f,c}$.

$$F_{v,w,Ed} \leq b_w h_w \left(1 + \frac{0,5(h_{f,t} + h_{f,c})}{h_w} \right) f_{v,0,d} \quad \text{для} \quad h_w \leq 35b_w. \quad (1)$$

У випадку, коли $h_{f,t}$ та $h_{f,c}$ однакові, замість рівняння (1) можна використовувати модифіковане рівняння:

$$F_{v,w,Ed} \leq b_w (h_w + h_f) f_{v,0,d}, \quad (2)$$

$$F_{v,w,Ed} \leq 35b_w^2 \left(1 + \frac{0,5(h_{f,t} + h_{f,c})}{h_w} \right) f_{v,0,d} \quad \text{для} \quad 35b_w \leq h_w \leq 70b_w. \quad (3)$$

Спрощені методи проектування панелей Kielsteg, які є подібними до PRX панелей, запропонували наступні алгоритми проектування, наведені в роботах [6, 11, 12], де $V_{w,k}$ та $R_{w,k}$ – характеристичні значення діючої сили зсуву та несуча здатність до зсуву стінки панелі, а ефективний поперечний переріз стінки позначено як $A_{w,eff}$:

$$V_{w,k} = R_{w,k} = A_{w,eff} \cdot f_{v,eff,k}, \quad (4)$$

$$A_{w,eff} = b_w h_w \left[1 + \frac{0,5(h_{f,t} + h_{f,c})}{h_w} \right], \quad A_{w,eff} = b_w [h_w + h_f] \quad (5)$$

Ефективна міцність на зсув у площині фанерних стінок – це добуток характеристичної міцності на зсув у площині матеріалу стінки $f_{v,0,k}$ та редукційного коефіцієнту ξ . Коефіцієнт ξ є напівемпіричним параметром, що базується на результатах випробувань, і залежить від співвідношення висоти та товщини стінок h_w/b_w .

$$f_{v,eff,k} = f_{v,0,k} \cdot \xi, \quad (6)$$

$$\xi = 0,1124 + 772 \left(\frac{b_w}{h_w} \right)^2. \quad (7)$$

Відповідно до ETA-18/1014 “KielstegVorgefertigte tragende Tafeln aus Holz und Holzwerkstoffen” [6] ефективну міцність на зсув у фанерних полотнах $f_{v,w,eff,k}$ потрібно обчислювати залежно від деякого іншого співвідношення h_w/b_w порівняно з EN1995-1-1 [9]:

$$f_{v,w,eff,k} = f_{v,0,k} = 7,5N/mm^2 \quad \text{для} \quad h_w/b_w < 30, \quad (8)$$

$$f_{v,w,eff,k} = 7,5 \left[0,1124 + 772 \left(\frac{b_w}{h_w} \right)^2 \right] \quad \text{для} \quad 30 \leq h_w / b_w \leq 66. \quad (9)$$

Дещо інший алгоритм розрахунку міцності пропонується для обчислення міцності зігнутих стінок ПРХ панелей при дії зсуву. Дотичні напруження мають бути меншими за міцність фанери на зсув:

$$\tau = \frac{Q \cdot S_f}{J \cdot b_w \cdot \varphi_X} \leq f_{v,w,d}, \quad (10)$$

де:

Q – сила зсуву;

S_f – статичний момент полиці відносно нейтральної осі розглянутої балки;

J – момент інерції балки;

t_w – товщина фанерних стінок;

φ_x – коефіцієнт стійкості фанерних стінок, що визначається наступним чином:

$$\varphi_X = 1 - \frac{\tau_u}{\tau_{cr}}. \quad (11)$$

Граничне напруження зсуву для фанерної стіни приймається рівним τ_u = 7,5 МПа. Критичне напруження зсуву (рівняння 12) належить до розрахункової практики вигнутих фанерних циліндричних обшивок крил та корпусів літаків:

$$\tau_{cr} = \frac{k_1 \cdot E_w}{\left(\frac{H_w}{b_w} \right)^2} + 0,1 \frac{E_w}{R}, \quad (12)$$

де:

E_w – модуль пружності фанери;

R – радіус кривизни полотна фанери;

k₁ – коефіцієнт, що залежить від умов кріплення сторін панелі обшивки: для вільно опертих сторін панелі k₁=5; та для защемлених сторін k₁=7,5.

Результати досліджень. Порівняння величин редуційних коефіцієнтів за вище наведеними методиками наведені для ПРХ панелей виходячи з їх геометрії поперечного перерізу (табл. 1), і з величини співвідношення висоти стінки h_w до її ширини b_w (рис. 4). Для ПРХ панелей висотою перерізу 600 мм і вище спостерігається зниження міцності на зсув.

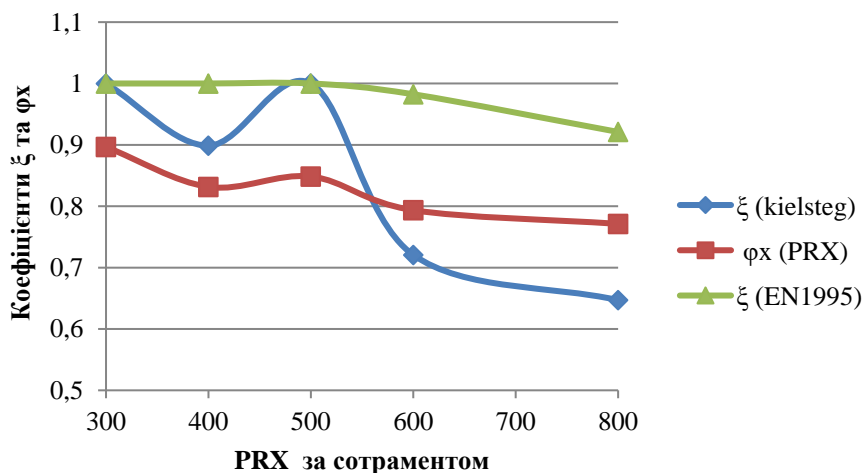


Рис. 4. Значення редуційних коефіцієнтів для фанерних стінок при зсуві

Важливою перевіркою міцності для легких тонко-реберних конструкцій є несуча здатність на стиск в зоні спирання панелі на кінцях панелі так і на проміжних опорах або при умові консольно-балочної схеми використання ПРХ панелей. Розрахунок міцності ПРХ панелі при стиску на опорі виконується наступним чином, а саме для полук:

$$\frac{F_{f,Ed}}{l \cdot b_f \cdot k_{c,90} \cdot f_{c,90,f,d}} \leq 1, \quad (13)$$

$$F_{f,Ed} = F_{Ed} \cdot \frac{E_{m,90,f,mean} \cdot b_f}{E_{m,90,f,mean} \cdot b_f + 2 \cdot E_{c,90,w,mean} \cdot b_w}, \quad (14)$$

де:

$F_{f,Ed}$ – розрахункове значення частки опорної сили на суцільній дерев'яній полці;

F_{Ed} – розрахункове значення загальної опорної сили на ідеалізований поперечний переріз;

$E_{m,90,f,mean}$ – модуль пружності при згині полук балки у поперечному напрямі відносно напрямку волокон;

$E_{c,90,w,mean}$ – модуль пружності при стиску в площині стінки поперек волокон відносно зовнішніх шарів шпону;

$k_{c,90}$ – коефіцієнт умов навантаження поперек волокон, який дорівнює 1,25 згідно до EN1995-1-1;

$f_{c,90,f,d}$ – розрахункове значення міцності при стиску поперек волокон полук;

l – довжина опори, яка сприймає навантаження.

Для стінок слід використовуватися аналогічні вирази:

$$\frac{F_{w,Ed}}{2 \cdot l \cdot b_w \cdot f_{c,90,w,d}} \leq 1, \quad (15)$$

$$F_{w,Ed} = F_{Ed} \cdot \frac{2 \cdot E_{c,90,w,mean} \cdot b_w}{E_{m,90,f,mean} \cdot b_f + 2 \cdot E_{c,90,w,mean} \cdot b_w}, \quad (16)$$

де:

$F_{w,Ed}$ – розрахункове значення частки опорної сили на стінці товщиною $2 \cdot b_w$;

$f_{c,90,w,d}$ – розрахункове значення міцності на стиск стінки в площині, перпендикулярній напрямку волокон зовнішніх шарів.

Верифікація точності інженерного методу розрахунку експериментальні випробування є край важливою для подальших коригувань конструкції панелі з урахуванням характеру руйнування і виявлення недоліків. На рис. 5 показано загальний вид перед прикладанням навантаження (рис. 6, а) ПРХ панелі довжиною 3000мм (прольотом 2,8мм), шириною 750мм та висотою перерізу 208мм. Схема навантажень – 4-точковий згин з прикладанням зосереджених сил у третях панелі через накладки, які передають навантаження по всій ширині панелі. Для фіксації вертикальних переміщень у місцях прикладання навантажень влаштовувались прогиноміри (D-2 та D-4), а в середині прольоту прогиномір D-3. Для визначення кута повороту торцевих ребер панелі встановлювались індикатори лінійних переміщень по середині відносно її ширини та у верхній точці відносно висоти перерізу. Навантаження панелі виконувалось з рівномірним зростанням навантаження у інтервалі часу 300+/-120с до руйнування (рис. 6, б) згідно вимог стандарту ДСТУ EN408 [13].

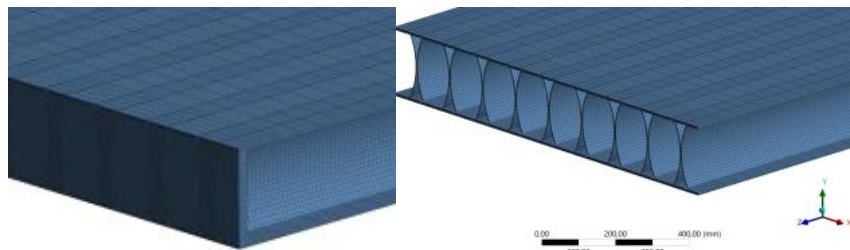


а)

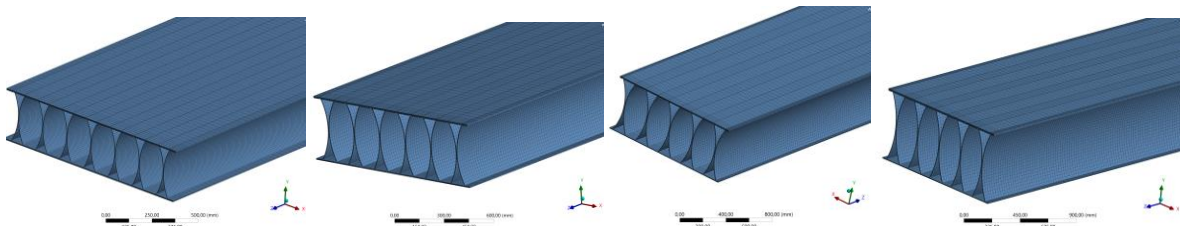
б)

Рис. 5. Загальний вид панелі перед випробуванням (а) та після руйнування (б)

Аналітичний розрахунок всіх типів ПРХ панелей виконувався у програмному комплексі ANSYS шляхом використання об'ємних скінчених елементів (рис. 6) та введення пружних характеристик як для ортотропного матеріалу з трьома осями пружної симетрії матеріалу: $E_x=5500\text{N/mm}^2$, $E_y=370\text{N/mm}^2$, $E_z=1000\text{N/mm}^2$, $G_{xy}=700\text{N/mm}^2$, $G_{xz}=700\text{N/mm}^2$, $G_{yz}=200\text{N/mm}^2$, $\nu_{xy}=0,042$, $\nu_{yz}=0,015$, $\nu_{xy}=0,35$.



а) тип панелі PRX200 з опорним ребром жорсткості та без нього



б) PRX300

в) PRX400

г) PRX500

д) PRX600

Рис. 6. Об'ємі скінчено-елементні моделі панелей ПРХ різних типів

Отримані результати прогинів кутових переміщень, дотичних (рис. 7) та нормальних (рис. 8) напружень відносно різних осей показали співпадіння максимально напружених зон з місцями руйнування та візуальних деформацій і утворених тріщин під час випробувань.

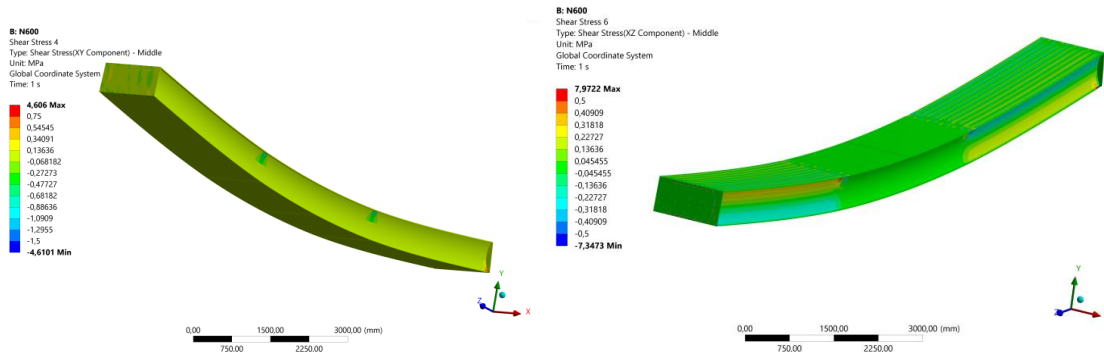


Рис. 7. Розподіл дотичних напружень у ПРХ панелі

На рис. 8 показано характер розподілу нормальних напружень в ПРХ панелях висотою перерізу 200, 300, 400 та 500 мм.

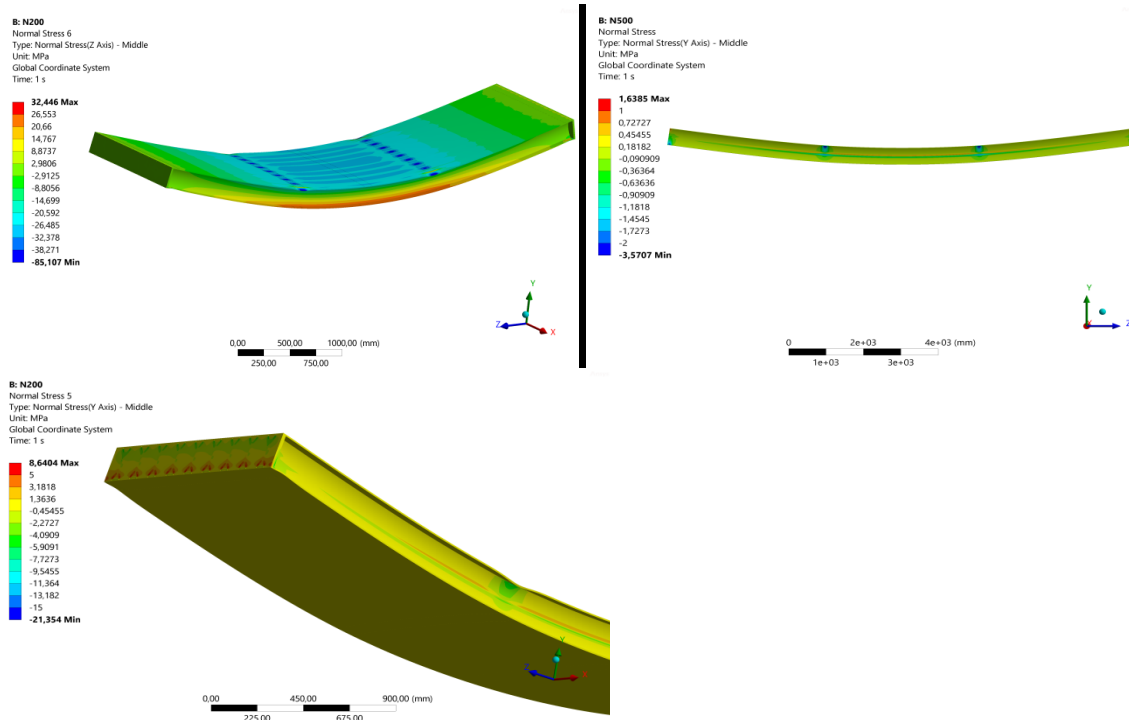


Рис. 8. Розподіл нормальних напружень у ПРХ панелях

Порівняння деформативності ПРХ панелі у середині прольоту (крива D-3) та в місцях прикладання навантаження (криві D-2 та D-4) з деформаціями у середині прольоту при чисельному аналізі у програмному комплексі ANSYS (лінія «Ansys») показано на рис. 9. Лінійна апроксимація показує рівнянням достовірність отриманих експериментальних даних для прогину у середині прольоту.

Аналіз інтенсивності кутових деформацій відносно інтенсивності деформацій у середині прольоту та в місцях прикладання навантаження показує близьке співпадіння, що підтверджується характером роботи зігнутих стінок з певним перерозподілом напружень та змінної форми стінок по довжині панелі з відповідною затухаючою складовою до опорних зон від середини прольоту.

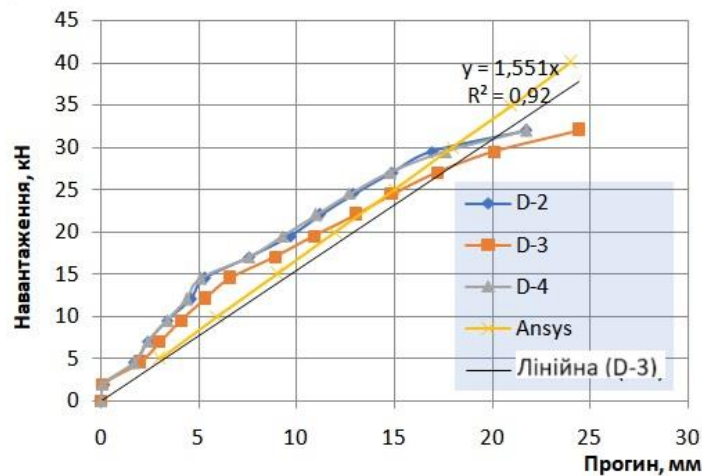


Рис. 9. Крива деформація-навантаження для панелі при випробуваннях і за результатами чисельного розрахунку

Умови експлуатації ПРХ панелей у відповідності до норм вогнестійкості викликають необхідність розробки рішень перерізів панелей з обшивками із клеєної деревини товщиною 50-90мм в залежності від класу вогнестійкості і відповідно часу який має витримати конструкцій до початку руйнування (REI45 чи REI60), див. ДБН В.1.1-7:2016 [14]. Таким чином ПРХ панель буде мати перерізи близькі до Кільштег панелей і напрацювання по балкам з Х-подібними стінками будуть більш дотичними до ПРХ панелей з обшивками з клеєної деревини, оскільки у балках при випробуваннях розглядався переріз з товстими поясами.

Висновки. Панель PRX – це інноваційне рішення для перекриттів та дахів будівель зі значними параметрами жорсткості завдяки роботі Х-подібних фанерних стінок. Легкість та висока міцність таких панелей, враховуючи їх автоматизацію виробництва, роблять їх конкурентоспроможним рішенням для CLT-панелей, особливо при прольотах 7 м і більше. Запропонований інженерний метод розрахунку таких панелей з Х-подібними фанерними ребрами в PRX панелях базується на методи, запропонованому в EC-5 для тонкостінних балок коробчастого та двотаврового перерізу, але з урахуванням особливостей роботи криволінійних стінок, шляхом використання додаткового коефіцієнта ϕ_x для розрахунку міцності на зсув стінок. Різниця редуційних параметрів за різними методиками складає 9-12%, де коефіцієнт для ПРХ панелей є більшим. Проведені статичні випробування панелі показали її деформативність та місця руйнування панелі і сам характер руйнування.

Для точної оцінки впливу кривизни стінки на значення жорсткості панелі та характер перерозподілу зусиль в обшивках було проведено аналіз методом скінчених елементів об'ємних моделей різних типів PRX панелей. Аналіз запропонованого методу розрахунку методом Eurocode-5 шляхом апроксимації Х-подібної балки двотавровою балкою показав незначні відмінності [15]. Порівняльний аналіз експериментальних випробувань PRX панелі та результатів чисельного розрахунку показує максимальну різницю у прогинах 2,4-3,1мм при межі навантаженні близької до половини несучої здатності для якої характерна зміна інтенсивності деформацій. При цьому експериментальні величини прогину у середині прольоту менша ніж за результатами обчислень.

Найвні результати проведених досліджень дають впевненість у практичному використанні запропонованих ПРХ панелей у будівництві покриттів та потребує додаткових подальших досліджень всієї типології панелей за сортаментом і досліджень вузлових з'єднань ПРХ панелей.

Література

1. Бідаков А.М. Збільшення міцності та стійкості клеєфанерних балок шляхом влаштування Х-подібної фанерної стінки: дис. д-ра техн. наук: 05.23.01 / Київський національний університет будівництва і архітектури. Харків, 2014, 185 с.
2. Патент на винахід №104243 «Клеєфанерна балка з Х-подібною стінкою». Фурсов Вадим Вікторович, Бідаков Андрій Миколайович, 10.01.14, Бюл. №1. UA104243.
3. Патент на корисну модель №150812 «Клеєфанерна панель», Бідаков Андрій Миколайович, 20.04.22, Бюл. №16. U2021 07020.
4. Kielsteg. URL: <https://www.kielsteg.com/> (дата звернення: 19.04. 2025).
5. Kulmerbau. URL: https://www.kulmerbau.at/kielsteg_68.htm. (дата звернення: 19.04. 2025).
6. ETA-18/1014. Kielsteg. Pre-fabricated wood-based loadbearing stressed Skin Panels. European Technical Assessment. 2019, 34 p.
7. EN12369-2:2011. Wood-based panels – Characteristic values for structural design – Part 2: Plywood. CEN/TC 250/SC 5. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
8. EN 636:2012. Plywood – Specifications. European Committee for Standardization CEN, Brussels, Belgium.
9. EN1995-1-1:2004. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, CEN, Brussels, Belgium.
10. prEN 1995-1-1:2023. Eurocode 5: Design of timber structures – Common rules and rules for buildings – Part 1-1: General. CEN/TC 250/SC 5. European Committee for Standardization,

Brussels, Belgium

11. Aicher S., Stritzke C., Klöck W. Keel-Web Element – Novel Wood-Based Lightweight Element For Wide Spans, *World conference on Timber Engineering*, Quebec, Canada, 2014.

12. Aicher S., Stritzke C. Novel lightweight timber composite element – web design in shear and compression. In: S. Aicher, H.-W. Reinhardt, H. Garrecht, Eds., Springer Dordrecht, Heidelberg, 2013, pp. 135-148.

13. ДСТУ EN 408:2007. Лісоматеріали конструкційні. Конструкційна та клеєна шарувата деревина. Визначення деяких фізичних та механічних властивостей (EN 408:2003, IDT).

14. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги [Чинний від 2017-06-01]. К.: Мінрегіонбуд України, 2017. 47 с. (Національний стандарт України)

15. Bidakov A., Strashko B., Stepinac M., Jockwer R. World Conference on Timber Engineering 2021, WCTE 20212, Reinforcement of moment resisting joints in LVL frames. URL: <https://research.chalmers.se/en/publication/527643>. Дата звернення: 01.05.2025.

References

- [1] A.M. Bidakov, "Zbilshennia mitsnosti ta stiikosti kleiefanernykh balok shliakhom vlashtuvannia Kh-podibnoi faneranoi stinka": dis. d-ra tekhn. nauk: 05.23.01, Kiïvskii natsionalnii universitet budivnitstva i arkhitekturi. Kharkiv, 2014.
- [2] Patent na vynakhid no. 104243. "Kleiefanerna balka z Kh-podibnoiu stinkoiu", Fursov Vadym Viktorovych, Bidakov Andrii Mykolaiovych, 10.01.14, Biul. no.1. UA104243.
- [3] Patent na korysnu model no. 150812. "Kleiefanerna panel", Bidakov Andrii Mykolaiovych, 20.04.22, Biul. no.16. U2021 07020.
- [4] Kielsteg. [Online]. Available: <https://www.kielsteg.com/> Accessed on: April 19, 2025.
- [5] Kulmerbau. [Online]. Available: https://www.kulmerbau.at/kielsteg_68.htm. Accessed on: April 19, 2025.
- [6] ETA-18/1014. Kielsteg. Pre-fabricated wood-based loadbearing stressed Skin Panels. European Technical Assessment, 2019.
- [7] EN12369-2:2011. Wood-based panels – Characteristic values for structural design – Part 2: Plywood. CEN/TC 250/SC 5. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [8] EN 636:2012. Plywood – Specifications. European Committee for Standardization CEN, Brussels, Belgium.
- [9] EN1995-1-1:2004. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, CEN, Brussels, Belgium.
- [10] EN 1995-1-1:2023. Eurocode 5: Design of timber structures – Common rules and rules for buildings – Part 1-1: General. CEN/TC 250/SC 5. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [11] S. Aicher, C. Stritzke, W. Klöck, "Keel-Web Element – Novel Wood-Based Lightweight Element For Wide Spans", *World conference on Timber Engineering*, Quebec, Canada, 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/265178293_KEEL-WEB_ELEMENT_-_NOVEL_WOOD-BASED_LIGHTWEIGHT_ELEMENT_FOR_WIDE_SPANS. Accessed on: April 19, 2025.
- [12] S. Aicher, H.-W. Reinhardt, H. Garrecht, Eds., *Novel lightweight timber composite element – web design in shear and compression*, Springer Dordrecht, Heidelberg, 2013, pp. 135-148.
- [13] DSTU EN 408:2007. Lisomaterialy konstruktsiini. Konstruktsiina ta kleiena sharuvata derevyna. Vyznachennia deiakykh fizychnykh ta mekhanichnykh vlastyvostei (EN 408:2003, IDT).
- [14] DBN V.1.1-7:2016. Pozhezhna bezpeka obiektiv budivnytstva. Zahalni. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2017.
- [15] A. Bidakov, B. Strashko, M. Stepinac, R. Jockwer, "Reinforcement of moment resisting joints in LVL frames", *World Conference on Timber Engineering*, 2021. [Online]. Available: <https://research.chalmers.se/en/publication/527643>. Accessed on: April 19, 2025.

LIGHTWEIGHT PLYWOOD PANELS WITH CURVED X-SHAPED LONGITUDINAL RIBS OF RIGIDITY

¹**Bidakov A.M.**, D.Sc., Associate Professor,
bidakov@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6394-2247

¹**Pustovoitova O.M.**, PhD, Associate Professor,
oksana_pustov@ukr.net, ORCID: 0009-0003-4774-6686

¹**Yefymovych V.**, Student,
slavmovich@gmail.com, ORCID: 0009-0000-4159-2784

¹*O.M. Beketov National University of Urban Economy*
17, Chernoglazivska str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Abstract. The current state of the construction industry in Ukraine increases every year the percentage of buildings implemented using wood in new construction, picking up the trend of European countries, where wood is becoming the main material in the implementation of residential and public buildings. The number of floors of such timber frames already reaches 20-30 floors with load-bearing frame structures made of glued-laminated timber and CLT panels. The latter are a new innovative panel-type material that allows assembling buildings of various thicknesses easily and quickly, but their efficiency is significantly reduced for spans of more than 6 m. The proposed plywood lightweight panels or PRX panels are a solution to the problem of simple covering for increased spans of coverings and floors due to an innovative approach using bent longitudinal ribs of panels for stability of which the arrangement of transverse ribs is not required. The problem of this type of panels consists in determining the compliance of X-shaped plywood ribs based on research with the development of a simplified calculation method as a system of factors or coefficients correcting traditional algorithms for calculating similar thin-webbed structures operating in bending. In the proposed development of lightweight and simultaneously rigid panels, the main emphasis was placed on the simplicity and manufacturability of panel production, relying on modern automated production equipment. PRX panels can be used as elements of self-supporting walls.

The purpose of developing innovative lightweight plywood panels was to create a new technological solution for ceilings and roofs of buildings for spans of 7-20 m. The idea of lightweight and rigid panels with X-shaped curved webs or ribs is a continuation of research on beams with such walls, where the efficiency of the curved shape of plywood walls showed certain advantages compared to classic I-beams with plywood webs. The proposed solution of the covering panels allows assembling buildings for various purposes and place insulation and some communications inside the panels quickly. To clarify the parameters of strength, deformability and determine the nature of panel failures, full-scale static tests of a full-scale sample were conducted, as well as numerical studies were performed in analytical software packages with a focus on the behavior and compliance of curved plywood walls at different stages of panel loading. Based on the experimental and numerical data obtained, a methodology was proposed that takes into account not only the geometry of the cross-section, but also its sweating of plywood walls or longitudinal ribs of PRX panels.

Keywords: plywood panels, PRX, slip, bent stiffeners, X-shaped ribs, loss of stability, roof panels.

Стаття надійшла до редакції 9.05.2025

Стаття прийнята до друку 5.06.2025

Дата публікації статті 24.09.2025

This work by © 2025 by Бідаков А.М., Пустовойтова О.М., Єфимович В.Ю. is licensed under CC BY 4.0

**SEISMIC RESISTANCE OF LARGE-PANEL BUILDINGS IN SEISMIC REGIONS.
RETROSPECTIVE ANALYSIS OF REGULATORY FRAMEWORK**

^{1,2}**Murashko O.V.**, Doctor of Engineering, Associate Professor,
alexeymurashko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2812-5951

²**Kriuchkov K.A.**, graduate student,
latand666@gmail.com, ORCID: 0009-0007-4846-0259

²**Voloshchuk V.V.**, PhD,
vadims9292@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6259-7090

²**Petrash A.S.**, master,
petrash.andreyka@gmail.com, ORCID: 0009-0009-9727-4983

¹*National University "Odeska Polytechnic"*

Shevchenka Avenue, 1, Odesa, 65044, Ukraine

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
4, street Didrichson, Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. The article presents an extensive retrospective analysis of the regulatory framework governing seismic-resistant design of large-panel buildings in seismic regions of Ukraine, spanning from early Soviet documents (PSP-101-51, SN 8-57) and subsequent SNiP regulations (II-A.12-62, II-12-69, II-7-81) to contemporary DBN V.1.1-12:2006 and DBN V.1.1-12:2014. The study's relevance stems from increased design seismic intensity in numerous regions following the implementation of ZSR-2004 maps, which necessitated reassessment of seismic resistance in buildings previously constructed without appropriate anti-seismic measures. The authors systematized key regulatory criteria (maximum building height and length, minimum requirements for joints and reinforcement, calculation methods) in a comparative table to demonstrate the trends of increasing requirements and transition from general recommendations to precise numerical limitations. A comprehensive, structured approach was applied, including documentary research, thematic analysis, and systematic grouping of regulatory requirements, which enabled establishing the relationship between the construction period of a large-panel building and its degree of compliance with current standards. The study demonstrates that the development of requirements has occurred in response to accumulated experience, technological advances, and international influences, resulting in modern calculation methods (spectral, nonlinear), detailed specifications for joints and reinforcement, and possibilities for seismic isolation implementation. The obtained results provide opportunities for direct integration into the methodology of visual assessment and certification of existing residential buildings, significantly optimizing the process of identifying potentially problematic structural elements and facilitating the development of scientifically substantiated solutions for strengthening load-bearing structures by engineers. Thus, the retrospective approach serves as a valuable tool for improving the efficiency of seismic resistance assessment, optimizing resources for building reinforcement, and enhancing regulatory documents in the field of seismic-resistant construction.

Keywords: seismic resistance, large-panel buildings, retrospective analysis, regulatory framework, seismic regions.

Introduction. Ensuring the seismic resistance of buildings has become increasingly critical in Ukraine's earthquake-prone regions, where recent seismic hazard reassessments have highlighted the vulnerability of existing housing stock [1-3]. During the Soviet era, particularly in the latter half of the 20th century, large-panel buildings were constructed en masse across what is now Ukraine, often without adequate consideration of seismic requirements. This oversight occurred because contemporary building codes, specifically SNiP II-A.12-62, mandated anti-seismic measures only for areas with design seismicity of 7 points or higher (clause 1.1 SNiP). Regions with lower seismicity

ratings (such as 6 points) were generally deemed not to require special seismic provisions, though subsequent code revisions (SNiP II-7-81*) did introduce exceptions for critical structures built on weak soils, even in 6-point zones. The situation changed dramatically with the adoption of the ZSR-2004 general seismic zoning maps, which upgraded the seismic intensity by one point or more for numerous regions of Ukraine [4, 5]. Consequently, a substantial portion of existing large-panel building stock now falls within zones of elevated seismic hazard (6-9 points), necessitating compliance with earthquake-resistant construction standards.

Visual assessment methods for evaluating the seismic resistance of existing structures, especially large-panel buildings, is gaining considerable attention [2-3, 6]. Comprehensive assessment criteria have been explored in detail [7]. A particularly valuable tool in this assessment process would be a retrospective analysis of building codes, which reveals what standards were applicable during construction, highlights discrepancies with current requirements, and identifies potential structural vulnerabilities.

This paper presents a thorough retrospective examination of regulatory requirements specific to large-panel buildings in Ukraine's seismic zones, tracing their evolution from early Soviet-era documents (PSP-101-51, SN 8-57) through subsequent SNiP codes (II-A.12-62, II-12-69, II-7-81) to contemporary state building standards (DBN V.1.1-12:2006 [4], DBN V.1.1-12:2014 [5]).

The scientific novelty of this work lies in its systematic compilation of regulatory criteria and requirements that have evolved over several decades, along with the identification of both constant and evolving elements within the seismic resistance regulatory framework for large-panel buildings. This approach facilitates the integration of retrospective analysis into contemporary visual assessment and certification methodologies for Soviet-era buildings that were constructed without consideration of current seismic standards. As a result, engineers can develop more accurate and well-substantiated reinforcement recommendations. Through detailed comparative analysis of documents from different periods, we demonstrate how a large-panel building's construction date can serve as a reliable indicator of potential non-compliance with modern standards.

Analysis of research and publications. Retrospective regulatory analysis has proven valuable both internationally (FEMA 154 [8-13]) and domestically [1-3, 6]. Within the former USSR and modern Ukraine, building code evolution spans from the 1950s to today. The progression from PSP-101-51 and SN 8-57 through SNiP II-A.12-62, II-12-69, and II-7-81 to current standards DBN V.1.1-12:2006 [4] and DBN V.1.1-12:2014 [5] reveals a clear shift from broad guidelines to precise computational requirements. This evolution includes the introduction of seismic zoning maps and increasingly sophisticated analytical methods, including nonlinear static (pushover) and direct dynamic analyses. Similar retrospective studies have already been conducted for masonry structures [14-15].

Purpose of the study. This research aims to provide a comprehensive retrospective analysis of regulatory requirements for large-panel buildings in seismic zones, identify trends in requirement intensification, document changes in regional seismic classifications, and establish a methodological foundation for preliminary seismic resistance assessments of existing buildings.

Materials and research methodology. We identified and analyzed key regulatory documents (PSP-101-51, SN 8-57, SNiP II-A.12-62, SNiP II-12-69, SNiP II-7-81, DBN V.1.1-12:2006 [4], DBN V.1.1-12:2014 [5]) that governed large-panel building design in seismic regions. Using content analysis techniques, we extracted critical provisions from each document regarding large-panel buildings, including requirements for maximum height (story limits), building length, joint design and reinforcement, and calculation methods. We conducted targeted searches using relevant keywords and their parts ("large-panel", "panel walls", "prefabricated elements", "panel joints", etc.) to ensure comprehensive coverage. The findings were organized into a comparative table (Table 1). Subsequently, we analyzed evolutionary trends in regulatory requirements, examining which provisions became more detailed, which remained unchanged, and how these changes corresponded with the introduction of new analytical methods and updated seismic zoning maps.

Historical development of the regulatory framework. The evolution of seismic resistance requirements throughout the 20th and into the 21st century represents a continuous refinement process. Ukraine's regulatory framework developed within the Soviet system, drawing on

construction experience from various seismically active USSR regions including the Caucasus, Central Asia, and the Far East. Initial anti-seismic construction rules emerged in the 1930s, prompted by earthquakes of 7-9 point intensity that drove the search for protective building solutions [3]. These early documents prioritized symmetrical floor plans and rigid horizontal and vertical connections, though computational methods remained rudimentary due to technological limitations.

The 1950s marked the introduction of systematic seismic design standards (PSP-101-51, SN 8-57). These underwent progressive refinement in subsequent SNiP codes, particularly II-A 12-62, II-A 12-69, and II-7-81, which increasingly incorporated international best practices and research institute findings. Following independence in 1991, Ukraine began adapting Soviet standards to national conditions, accounting for local geological characteristics. Current standards DNB V.1.1-12:2006 and V.1.1-12:2014 [4-5] incorporate the ZSR-2004 maps, which significantly increased seismic intensity ratings across large areas. This change has necessitated widespread reassessment of existing buildings, particularly large-panel structures.

Our analysis focused on key requirements including:

- Maximum height (story limits) for various seismic intensities.
- Maximum building length restrictions.
- Embedded element spacing in joints and minimum reinforcement cross-sections.
- Structural requirements for joints, anti-seismic belts, and reinforcement.
- Calculation methodologies.

It should be noted that this analysis specifically addresses codes applicable to Ukrainian territory (including the Soviet period) to develop a national methodology for visual seismic assessment. International standards are not explicitly addressed.

Research Results.

Maximum building height (large-panel walls):

●PSP-101-51 (~1951). This document established no specific height restrictions for large-panel buildings, as seismic design practices for panel construction remained undeveloped. The code emphasized general structural solutions and plan symmetry but stopped short of specifying formal story limits.

●SN 8-57 (1957). For 7-8 point seismicity zones, the code permitted large-panel buildings to reach heights comparable to those in non-seismic regions, imposing no direct restrictions. However, buildings in these zones still required reinforced joint grouting and adequate embedded hardware. In contrast, 9-point zones faced a recommended height limit of approximately 30 m (roughly 9-10 stories), with mandatory emphasis on joint reinforcement and increased building rigidity per clause 66 of SN 8-57.

●SNiP II-A.12-62 (1962). These standards maintained the permissive approach, imposing no additional height restrictions for large-panel buildings in 7, 8, or 9-point zones, effectively treating them like non-seismic areas in terms of height. Nevertheless, the code mandated enhanced monolithic joint behavior and vibration resistance, prioritizing calculation-based justification and verified connection strength over prescriptive height limits.

●SNiP II-12-69 (1969). This document marked a turning point by introducing explicit height limits: 39 m for 7-point zones, 30 m for 8-point zones, and 24 m for 9-point zones for large-panel buildings.

●SNiP II-7-81 (1981). The code further refined these restrictions, establishing height limits of 45 m (~14 stories) for 7-point zones, 39 m (~12 stories) for 8-point zones, and 30 m (~9 stories) for 9-point zones. These specifications not only provided greater clarity than previous standards but also coupled height restrictions with enhanced requirements for structural rigidity and joint monolithic behavior.

●DBN V.1.1-12:2006 (2006). Reflecting advances in construction technology and analysis methods, this code substantially increased allowable heights: 20 stories for 7-point zones, 16 stories for 8-point zones, and 10 stories for 9-point zones. Significantly, it also introduced provisions for exceeding these limits, provided projects included additional justification, experimental research, and scientific oversight.

●DBN V.1.1-12:2014 (2014). This revision retained the 2006 height restrictions unchanged: 20 stories for 7-point zones, 16 stories for 8-point zones, and 10 stories for 9-point zones, while maintaining flexibility for exceeding these limits under experimental construction programs.

Maximum building length:

●PSP-101-51 (~1951). The code imposed no specific length restrictions for large-panel buildings, treating this parameter as unregulated.

●SN 8-57 (1957) - SNiP II-A.12-62 (1962). Both codes maintained this permissive stance, allowing large-panel buildings to extend to lengths comparable to those in non-seismic regions without direct limitations. Instead of prescriptive length limits, these codes relied on ensuring adequate spatial structural behavior through proper spacing of embedded elements and comprehensive joint grouting.

●SNiP II-12-69 (1969). While continuing to allow lengths similar to non-seismic buildings, this code introduced the first absolute limit: structures could not exceed 150 m without being divided into separate sections, marking the beginning of length-based seismic design considerations.

●SNiP II-7-81 (1981), DBN V.1.1-12:2006 (2006), DBN V.1.1-12:2014 (2014). These later codes converged on more restrictive requirements, establishing maximum recommended lengths of 80 m for 7-8 point zones and 60 m for 9-point zones. This significant reduction from the earlier 150 m limit may reflect growing understanding that longer buildings experienced excessive horizontal deformations during earthquakes.

Frequency/minimum cross-section of joint connections:

●PSP-101-51 (~1951). The code remained silent on specific requirements for minimum cross-sections or embedded element frequency in large-panel building joints, providing only general anti-seismic guidance without addressing panel joint details.

●SN 8-57 (1957). This code introduced the first quantitative requirements: embedded elements in vertical and horizontal joints had to be spaced no more than 2 m apart for 7-8 point zones, with this spacing tightening to 1 m maximum for 9-point zones (clause 66, SN 8-57).

●SNiP II-A.12-62 (1962). Rather than specifying numerical requirements for embedded element frequency or connection cross-sections, this code took a performance-based approach, emphasizing joint monolithic behavior and minimization of weak joints to enhance overall seismic resistance.

●SNiP II-12-69 (1969). A critical advancement came with the introduction of minimum connection cross-section requirements: all seismic regions now required at least 1 cm²/m of reinforcement area.

●SNiP II-7-81 (1981). The code introduced differentiated requirements based on building height and seismic intensity: buildings up to 5 stories in 7-8 point zones could use a reduced minimum of 0.5 cm²/m, while all other configurations required the full 1 cm²/m standard.

●DBN V.1.1-12:2006 (2006) – DBN V.1.1-12:2014 (2014). Both modern codes standardized requirements across all high-seismic zones, mandating a uniform minimum of 1 cm²/m for 7, 8, and 9-point seismicity areas. This universal approach simplified design procedures while ensuring adequate reinforcement levels regardless of specific seismic intensity.

Structural requirements (panels, joints, diaphragms):

●PSP-101-51 (~1951). With panel construction in seismic regions still in its infancy, this code lacked specific requirements for large-panel systems and their joints. Design guidance focused solely on general anti-seismic principles: structural symmetry, rigidity, and spatial behavior.

●SN 8-57 (1957). The code began recommending specific construction practices: use of large panels combined with thoroughly grouted joints and embedded elements to achieve rigid connections between structural elements.

●SNiP II-A.12-62 (1962). This iteration prioritized achieving maximum joint monolithic behavior by minimizing the number of joints and increasing individual panel dimensions. This strategy effectively reduced stress concentrations at connections and improved structural reliability during seismic vibrations.

●SNiP II-12-69 (1969). The code introduced differentiated reinforcement requirements based on risk level: buildings up to 5 stories in 7-point zones could employ single reinforcement, while all

other configurations, whether due to height or higher seismicity, required double reinforcement to ensure adequate spatial rigidity.

- SNiP II-7-81 (1981). Technical specifications became more detailed, recommending room-sized panels paired with ribbed joint surfaces, welded embedded elements, and monolithic seams, designed to maximize inter-element bonding strength.

- DBN V.1.1-12:2006 (2006) – DBN V.1.1-12:2014 (2014). Modern codes mandate comprehensive reinforcement strategies: double-sided wall panel reinforcement at minimum 0.025%, ribbed joint surfaces for improved bonding, grouting with reinforcement outlets, and strategic vertical reinforcement at corners and opening edges. This last requirement ensures optimal force distribution while preventing crack formation at stress concentration points.

Joint and panel connection reinforcement. Throughout the entire evolution of Soviet and Ukrainian building codes, detailed additional requirements specifically for corner reinforcement in seismic large-panel buildings never emerged. Consequently, general large-panel building design requirements governed these details across all periods. Early documents like SN 8-57 addressed corner reinforcement primarily in the context of masonry construction, offering only general joint grouting recommendations for large-panel structures. All subsequent codes – SNiP II-A.12-62, SNiP II-12-69, SNiP II-7-81, DBN V.1.1-12:2006, and DBN V.1.1-12:2014 – continued this pattern, treating corner reinforcement not as a distinct design element but as part of the broader goal of ensuring overall joint monolithic behavior and rigidity.

Calculation methods. The sophistication of analytical approaches evolved dramatically over the decades. Early regulatory documents (PSP-101-51, SN 8-57, SNiP II-12-69, SNiP II-7-81) relied exclusively on simplified static assessments, lacking the computational tools for complex dynamic modeling. As technology advanced, later codes progressively incorporated dynamic methods. Today's DBN standards (2006, 2014) represent the culmination of this evolution, mandating spectral, direct dynamic, and nonlinear static (pushover) calculation methods while requiring consideration of multiple earthquake intensity scenarios. These key developments are summarized in Table 1.

Analysis of obtained results. The evolutionary trajectory of the regulatory framework reveals a consistent pattern of progressive refinement and increasing specificity in seismic construction requirements. Early regulatory documents offered broad guidelines that granted engineers considerable interpretive flexibility, a necessity given limited computational capabilities and earthquake engineering knowledge.

The subsequent shift toward detailed, prescriptive requirements arose from three converging factors: accumulated field experience from actual earthquakes, implementation of sophisticated seismic zoning maps (particularly ZSR-2004), and dramatic advances in computational technology. This evolution fundamentally transformed how engineers approach seismic design.

The transformation of building height requirements exemplifies this progression perfectly. The 1950s documents offered only general recommendations without quantitative limits. By the 1980s, the codes established precise, numerically defined height restrictions directly tied to site-specific seismicity levels. This same evolutionary pattern characterizes structural requirements: vague recommendations for joint arrangements and connections gradually crystallized into exact technical specifications, including precise minimum reinforcement cross-sections and maximum embedded element spacing.

These regulatory changes directly reflected lessons learned from devastating earthquakes worldwide and the integration of international best practices in seismic construction. The adoption of spectral and nonlinear calculation methods demonstrates the profession's commitment to achieving more accurate predictions of structural behavior during seismic events. For large-panel buildings specifically, these advanced methods finally enabled engineers to conduct detailed analyses of joint behavior, panel interactions, and complex vibration modes accounting for three-dimensional structural response – capabilities that were simply unavailable to earlier generations of engineers. This historical perspective on regulatory evolution provides the essential context for evaluating the technical condition and certifying the seismic resistance of Ukraine's existing large-panel building inventory.

Table 1 – Comparative table of large-panel building design requirements.

| Regulatory document | Max. height/stories | | | | Max. building length | Frequency/min. cross-section of joint connections | Structural requirements (panels, joints) |
|---------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--|--|---|
| PSP-101-51 | Not specified for LP* | | | | Not specified | Not mentioned | Not mentioned |
| SN 8-57 | 7-8 points | | 9 pts | | ns | 7-8 pts: embedded ≤ 2 m; 9 pts: ≤ 1 m | Use of large panels, grouted joints |
| | ns | | 30 m | | | | |
| SNiP II-A 12-62 | ns | | | | ns | Not directly regulated, emphasis on monolithic behavior | Emphasis on monolithic behavior, minimum joints, increased panel size |
| SNiP II-A 12-69 | 7 pts | 8 pts | 9 pts | | up to 150 m (for 7-8 points) | Introduced min. connection cross-section ≥ 1 cm ² /m | Double panel reinforcement (certain conditions for 7 points) |
| | 39 m | 30 m | 24 m | | | | |
| SNiP II-7-81 | 7 pts | 8 pts | 9 pts | | Recommended ≤ 80 m at 7-8 pts ≤ 60 m at 9 pts | At ≤ 5 stories (7-8 points): ≥ 0.5 cm ² /m; other cases ≥ 1 cm ² /m | Room-sized panels, ribbed joint surfaces, welded embedded elements, monolithic seams |
| | 45 m | 39 m | 30 m | | | | |
| DBN V.1.1-12:2006 | 6 pts | 7 pts | 8 pts | 9 pts | 7-8 pts: ≤ 80 m; 9 pts: ≤ 60 m | Minimum 1 cm ² /m for 7,8,9 points | Double-sided reinforcement ($\geq 0.025\%$), ribbed joints, vertical reinforcement at corners and opening edges |
| | ns | 20 st. | 16 st. | 10 st. | | | |
| DBN V.1.1-12:2014 | 6 pts | 7 pts | 8 pts | 9 pts | Same as DBN 2006: 7-8 pts ≤ 80 m, 9 pts ≤ 60 m | No change from 2006 | Similar requirements plus emphasis on structural ductility, possibility of seismic isolation and nonlinear calculations |
| | ns | 20 st. | 16 st. | 10 st. | | | |

Note: ns – not specified for LP; st. – stories.

Conclusions.

1. This comprehensive retrospective analysis has systematically examined the evolution of regulatory requirements governing seismic resistance of large-panel buildings across Ukrainian territory, revealing a clear progression from general principles to specific, quantitative standards.
2. The research identifies consistent strengthening trends in regulatory requirements over seven

decades, with the most pronounced changes occurring in height and length restrictions, joint detailing specifications, and reinforcement requirements – each responding to accumulated earthquake damage observations and advances in structural engineering knowledge.

3. The analysis demonstrates that a building's construction year serves as a reliable proxy for its likely compliance with current seismic standards: structures built under early codes predictably exhibit specific deficiencies when evaluated against modern requirements, enabling targeted assessment and retrofit strategies.

4. These findings offer immediate practical value for structural engineers conducting seismic assessments and certifications of existing housing stock, while simultaneously establishing a methodological framework for developing more sophisticated seismic resistance evaluation protocols for Soviet-era large-panel buildings.

References

- [1] A.V. Murashko, K.V. Egupov, D.I. Bezushko, O.V. Adamov, "Struktura ta etapy dynamichnoi pasportyzatsii budivel", *Visnik Odes'koï derzhavnoi akademii budivnictva ta arhitekturi*, no. 52, pp. 95-99, 2013.
- [2] V.S. Dorofeev, A.V. Murashko, "Sistema otsenki fakticheskoy seysmostoykosti zdaniy v svete deystvuyushchey normativnoy bazy", *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, no. 56, pp. 245-248, 2015.
- [3] A. Murashko, A. Gubanov, K. Kryuchkov, I. Benradi, "Retrospektivnyy analiz trebovaniy normativnykh dokumentov po seysmostoykomu stroitelstvu karkasnykh zdaniy", *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, no. 65, pp. 42-48, 2016.
- [4] DBN V.1.1-12:2006. Budivnytstvo v seysmichnykh rayonakh Ukrainy. Kyiv: Minbud Ukrainy, 2006.
- [5] DBN V.1.1-12:2014. Budivnytstvo v seysmichnykh rayonakh Ukrainy. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2014.
- [6] O.V. Murashko, I. Bernadi, M. Abdelhadi, "Approval of the developed visual assessment of seismic resistance, taking into account the irregular wall infill", *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, no. 78, pp. 34-40, 2016.
- [7] V.S. Dorofeev, A.V. Murashko, "Kriterii kompleksnoy otsenki seysmostoykosti zdaniy", *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy*, vyp. 29, pp. 139-144, 2014.
- [8] Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook, FEMA 154, Edition 2, 2002.
- [9] Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants. Concept et directives pour l'étape 1 Richtlinien des BWG – Directives de l'OFEG – Directive dell'UFAEG Berne, 2005 Deuxième édition.
- [10] Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes Prioritisation. Initial Evaluation. Detailed Assessment. Improvement Measures Recommendations of a NZSEE Study Group on Earthquake Risk Buildings Including Corregendum No. 1, 2006.
- [11] A. Yakut, V. Aydogan, G. Ozcebe, and M.S. Yucement, "Preliminary seismic vulnerability assessment of existing reinforced concrete buildings in Turkey – Part II", *Nato Science Series*, IV/29, pp 43-58, 2005.
- [12] 6. ICS 91. 120.25 Indian standard: Criteria for earthquake design of structures. [Online]. Available: <http://fr.slideshare.net/asifzhcet/1893-2002-part-17>. Accessed on: May 19, 2025.
- [13] NZS 1170-5 (SI). Structural design actions - Part 5: Earthquake actions - New Zealand Commentary [By Authority of New Zealand Structure Verification Method BI/VMI], approved by Council of Standards New Zealand on 21 December 2004.
- [14] V. Voloshchuk, O. Murashko, K. Kryuchkov, "Kompleksne urakhuvannya vplyvu otvoriv u stinakh ta typu perekryttiv pry vizualnomu otsinyuvanni seysmostoykosti budivel z tsehlyanoho muruvannya", *Nauka ta budivnytstvo*, vol. 38, no. 4, 2024.

<https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-8>.

[15] O.V. Murashko, V.V. Voloshchuk, "Retrospective analysis of the requirements of regulatory documents for seismic resistant construction of masonry buildings", *Suchasne budivnytstvo ta arkhitektura*, no. 10, pp. 37-44, 2024. <http://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-10-37-44>.

СЕЙСМОСТІЙКІСТЬ ВЕЛИКОПАНЕЛЬНИХ БУДИНКІВ У СЕЙСМІЧНИХ РАЙОНАХ. РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ

^{1,2}Мурашко О.В., д.т.н., доцент,
alexeymurashko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2812-5951

²Крючков К.А., аспірант,
latand666@gmail.com, ORCID: 0009-0007-4846-0259

²Волощук В.В., к.т.н.,
vadims9292@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6259-7090

²Петраш А.С., магістр,
petrash.andreyka@gmail.com, ORCID: 0009-0009-9727-4983

¹Національний університет «Одеська Політехніка»

проспект Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна

²Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. У статті представлено розширений ретроспективний аналіз нормативної бази, що стосується обмежень до великопанельних будинків у сейсмічних районах України, починаючи від перших радянських документів (ПСП-101-51, СН 8-57) та подальших СНіП (II-A.12-62, II-12-69, II-7-81), до сучасних ДБН В.1.1-12:2006 і ДБН В.1.1-12:2014. Актуальність дослідження зумовлена підвищенням розрахункової сейсмічності значної кількості регіонів внаслідок впровадження карт ЗСР-2004, що призвело до необхідності оцінювання сейсмостійкості будинків, зведених без урахування відповідних антисейсмічних заходів. Систематизовано ключові критерії норм (максимальна висота та довжина будинку, мінімальні вимоги до стиків і армування, розрахункові методи), що розміщені у порівняльній таблиці, аби продемонструвати тенденції зміни вимог та переходу від загальних рекомендацій до точних кількісних обмежень. Застосовано підхід, що включає документальний пошук, аналіз та групування нормативних вимог, що дало змогу встановити залежність між датою будівництва великопанельного будинку та ступенем його відповідності чинним нормам. Продемонстровано, що тенденція розвитку вимог є реакцією на накопичений досвід, технологічний прогрес та міжнародний досвід, у результаті чого з'явилися сучасні методи розрахунку (нелінійний статичний, прямий динамічний), деталізовані обмеження до стиків та армування, а також можливості застосування сейсмоізоляції. Отримані результати надають можливість інтеграції у методологію візуального оцінювання та паспортизації існуючого житлового фонду, що суттєво спрощує процес ідентифікації потенційного дефіциту сейсмостійкості, як окремих конструктивних елементів, так і будівель в цілому, а також сприяє розробці рішень щодо їхнього підсилення. Таким чином, виконаний ретроспективний аналіз слугує корисним інструментом для підвищення ефективності оцінювання сейсмостійкості та є наступним кроком у розвитку нормативних документів у напрямку сейсмостійкого будівництва.

Ключові слова: сейсмостійкість, великопанельні будинки, ретроспективний аналіз, нормативна база, сейсмічні райони.

Стаття надійшла до редакції 11.07.2025

Стаття прийнята до друку 30.07.2025

Дата публікації статті 24.09.2025

This work by © 2025 by [Murashko O.V., Kriuchkov K.A., Voloshchuk V.V., Petrash A.S.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

RESEARCH ON THE RESISTANCE OF VENTILATED RAINSCREEN FACADES TO DYNAMIC AND VIBRATIONAL LOADS

¹**Panchenko S.V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
panchenko074@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7626-9933

¹**Redko I.O.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
ihorredko1972@gmail.com, ORCID: 0009-0005-1556-0830

¹**Lobiak O.V.**, PhD, Assistant Professor,
lobiak_bmg@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9553-4245

¹**Dudin O.A.**, PhD, Assistant Professor,
dudin@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6838-1669

¹*Ukrainian State University of Railway Transport*
Feuerbach Square, 7, Kharkiv, 61050, Ukraine

Abstract. The study aims to determine the stability of KMD VF ventilated facades, featuring RONSON 250×65×22 Busum facade tiles, when subjected to vibrational and dynamic influences. A key objective is to assess their applicability in seismically active regions of Ukraine. To achieve this, both computational analyses of the stress-strain state of the facade system elements and experimental laboratory tests on a fragment of the system were conducted.

The research methodology involved a comprehensive literature review and analysis of existing technical documentation. An experimental procedure was developed for testing on a vibration stand, utilizing a Vibran-2.0 vibro-analyzer and a universal strain gauge station. A facade system fragment measuring 1000×900 mm was subjected to controlled vibrational loads. Concurrently, a numerical model of the fragment was developed and analyzed using the Lira-SAPR software. The computational results were then rigorously compared with the experimental data, confirming the adequacy of the calculation scheme with an error not exceeding 7%.

Furthermore, a detailed calculation of the facade system's response to seismic loads was performed for a hypothetical 36-meter high-rise building situated in a 9-point seismic zone, in accordance with DBN B.1.1-12:2014. The spectral method was employed, and the computational model utilized volumetric finite elements for the building and clinker, shell elements for brackets and purlins, and special finite elements for modeling connections between clinker-purlins, purlins-brackets, and brackets-building.

The experimental tests demonstrated the facade system's resilience and integrity. No individual tiles detached, and the connection nodes remained reliable, even under load levels corresponding to approximately 60% of a 9-point seismic event. The seismic load calculations further corroborated these findings, indicating that the overall bearing capacity utilization of the system did not exceed 65%, thereby maintaining a substantial 35% safety margin. Crucially, the protection against the fall of individual tiles was ensured with a significant 57% margin.

Based on the comprehensive results obtained from both experimental and computational investigations, it is concluded that the use of KMD VF ventilated facades, adorned with RONSON 250×65×22 Busum facade tiles, is feasible and recommended for construction projects located in seismically hazardous regions of Ukraine.

Keywords: ventilated facades, seismic resistance, dynamic influences, vibrational influences, facade tiles, experimental testing, stress-strain state.

Introduction. Ventilated facade systems (VFS) are an integral part of the modern construction industry, playing a key role in ensuring the energy efficiency, aesthetic appeal, and durability of buildings. These multi-layered structures include a load-bearing frame, an insulation layer, and an external cladding layer with a ventilated air gap. They are widely used in both new construction and in the reconstruction and major renovation of existing structures. Their purpose is

to improve the thermal performance of external enclosures and effectively protect buildings from aggressive atmospheric influences.

The increasing height of buildings and their location in seismic zones of Ukraine demand heightened attention to the dynamic and seismic stability of all structural elements, including "non-structural components" such as facade systems. Traditionally, facades were considered secondary elements that do not affect the overall load-bearing capacity of a building. However, modern research convincingly demonstrates that damage to non-structural elements during earthquakes is a primary cause of significant economic losses, directly threatens the lives of occupants and passers-by, and can lead to the disruption of building functionality [1, 2]. Insufficient attention to the seismic stability of facades can lead to a cascading effect, where the failure of one element causes further destruction and creates danger. Therefore, the relevance of this study lies not only in increasing the reliability of an individual element but also in ensuring the overall seismic stability and functionality of buildings, which has direct socio-economic consequences and is critically important for the safety of settlements in seismic regions.

Analysis of Recent Research and Publications. Recent years have seen a significant increase in scientific interest in studying the dynamic and seismic behavior of facade systems. Research in this field covers both large-scale experimental testing and complex numerical modeling, aimed at increasing the stability and safety of these elements. The importance of these studies is underscored by constantly growing safety requirements and compliance with modern building codes in seismic regions.

Shake-table tests are one of the most effective and reliable methods for assessing the seismic behavior of non-structural elements, including facade systems. Research conducted by Samali and Abtahi (2016) [3] showed that facade systems have the potential to act as dampers, dissipating earthquake energy, thereby reducing vibrations of the main structure. Their work demonstrated that by optimally selecting materials for the stiffness and damping of brackets connecting the two facade shells, a significant portion of earthquake-induced energy can be dissipated [3].

Further works, such as Di Sarno's (2018) [4] research on the seismic behavior of hospital cabinets (an example of non-structural elements), also used shake-table tests. This study investigated dynamic properties and performance criteria, such as rocking and overturning, confirming the versatility of shake-table testing methodology for evaluating various non-structural components and their damage mechanisms [4]. In the context of ventilated facades, other studies have also included shake-table tests to assess seismic behavior, specifically for gypsum board partitions, demonstrating their positive in-plane and out-of-plane behavior [5]. This indicates a general trend towards experimental confirmation of the reliability of non-structural elements under seismic loads. The application of experimental methods, particularly shake-table tests, for evaluating the seismic behavior of non-structural elements is a clear trend in modern science. The complexity of the dynamic interaction of facade systems with the main structure requires physical tests to validate theoretical models. The availability of experimental data is critically important for confirming the adequacy of calculation models, which is a central aspect of the current study, where the calculation error does not exceed 7%. This emphasizes the high level of reliability and validity of the results achieved in this work.

Parallel to experimental studies, numerical modeling, particularly the finite element method (FEM), is widely used to analyze the stress-strain state of facade systems. For example, Samali and Abtahi (2016) [3] used three-dimensional models to study the dynamic response of facades acting as dampers. Their studies showed that imperfections in connection details can lead to significant stresses and facade damage under seismic loads, emphasizing the critical importance of designing fastening nodes [3].

Research on assessing the seismic behavior of pre-stressed glass facade systems (PFGFS) also actively uses FEM, both at the local connection level (3D FEM in ABAQUS) and at the global system level (simplified models in SAP2000) [6]. This work highlights the vulnerability of non-structural components and proposes innovative low-damage connections to increase the load-bearing capacity of facades [6]. Other works have also used finite element analysis to study the

seismic behavior of composite walls with embedded steel elements [7]. In general, the application of FEM allows for detailed analysis of stress, deformation, and force distribution in complex facade systems, including fastening elements and cladding. An important aspect is the validation of numerical models using experimental data, as was done in the study of the energy efficiency of ventilated facades, where modeling results (TRNSYS) were compared with experimental data [8]. Numerical modeling allows for detailed investigation of facade behavior under loads [9-11]. However, its reliability is significantly enhanced when validated with experimental data. This creates a synergistic effect where each method compensates for the limitations of the other. The current study directly uses this approach, comparing calculations in Lira-CAD software with experimental data with an error of up to 7%. The combined approach (experiment + numerical modeling) is the most reliable for evaluating complex systems such as ventilated facades and allows for obtaining highly reliable results, which is critically important for responsible construction decisions.

Recent years' research consistently emphasizes the high vulnerability of non-structural elements, including facade systems, during earthquakes [1, 2]. Damage to these elements is a major cause of economic losses and can pose a threat to human safety [1, 2]. Samali and Abtahi (2016) [3] note that the facade, as a non-structural component with significant weight, can significantly affect the behavior of the main structure [3]. Projects such as ISCREANE (2023-2024) [2] aim to develop innovative methods and computational tools for the seismic assessment of non-structural elements, particularly for critical facilities (schools, hospitals) [2]. This includes the development of displacement-based methodologies and component fragility functions, allowing for more accurate prediction of their behavior and potential damage. The awareness of significant economic losses and life risks associated with damage to non-structural elements extends beyond purely engineering tasks, having direct social and economic consequences. This requires the development of new, more precise assessment methods. This need for innovation directly justifies the relevance of this study, which proposes precisely such a comprehensive approach to a specific type of facade system. Thus, research into the seismic stability of facades is not just a technical task, but part of a broader strategy to ensure the seismic stability of buildings and reduce risks to society.

Despite significant progress in research on the dynamic and seismic behavior of facade systems, unresolved issues remain regarding specific types of ventilated facade systems, their specific components, and their application under Ukrainian building codes. Existing studies often focus on general principles, certain types of cladding (e.g., glass panels [6], gypsum board partitions [5]), or specific regions (e.g., Kazakhstan [5]). However, a comprehensive assessment of the stability of the "KMD VF" system with RONSON 250×65×22 Busum facade tiles under vibrational and dynamic influences, as well as its applicability in seismic regions of Ukraine in accordance with DBN V.1.1-12:2006, remains insufficiently studied.

Although the general principles of seismic assessment of non-structural elements [1, 2] and methods of experimental and numerical studies [3-6, 8] are well developed, the specific characteristics of concrete facade systems, such as KMD VF with RONSON tiles, can differ significantly. Materials, structural solutions for fasteners (e.g., AD31T1 aluminum alloy, rivets, dowels), and their interaction under dynamic loads require individual assessment. Furthermore, the application of Ukrainian norms DBN V.1.1-12:2014 adds a unique regional context. This study fills an important gap by providing specific, validated data for a specific facade system under conditions compliant with Ukrainian building standards, which is critically important for practical application and construction safety in Ukraine.

Research Goal. To determine the stability of "KMD VF" ventilated facade systems with RONSON 250×65×22 Busum facade tiles under vibrational and dynamic influences. To determine the possibility of using this system in seismic regions of Ukraine, perform computational studies of the stress-strain state of the facade system elements and experimental laboratory tests of its fragment.

Research Objectives:

- Conduct an analysis of literature, initial data, and available technical documentation.

- Develop a methodology for the experiment, preparation of the test bench, and dynamic studies.
- Calculate a fragment of the facade system in the Lira-CAD software environment and compare the results with experimental data, draw conclusions regarding the adequacy of the calculation scheme and calculation methodology.
- Adopt the research and load-bearing capacity assessment methodology under seismic loads in accordance with [12-17].

Materials and Research Methodology. Ventilated facade systems are designed for thermal insulation and cladding of external enclosing structures, for new construction, reconstruction, and major repairs of existing buildings and structures.

KMD VF systems are multi-layered structures that include a load-bearing metal (aluminum alloy) frame (fastening system) attached to the base (load-bearing structures of the outer wall), an insulation layer, and a facade cladding layer attached to the elements of the load-bearing frame.

The KMD VF fastening system consists of parts and assembled units. By functional purpose, they can be divided into main parts (brackets, load-bearing posts), cladding elements (rivets, profiles), secondary parts (thermal breaks, auxiliary profiles), products for fastening brackets, insulation (anchors, facade dowels), parts for fastening the subsystem (bolts, nuts, washers, screws, pull rivets, self-tapping screws).

Basic parts and load-bearing elements of the fastening system are made of AD31T1 aluminum alloy DSTU B.V.2.6-30:2018 (6063).

During research and assessment of load-bearing capacity under seismic loads for KMD VF systems, numerical modeling using the finite element method is applied. Additionally, full-scale testing of key fastening nodes and system elements of a facade system fragment, secured on a vibration platform, is carried out to verify calculation models and refine material strength parameters under dynamic loads.

Research Results. Experimental tests of the facade system on a vibration stand were performed on a sample fragment with dimensions of 1000×900 mm (Fig. 1).

Vibration parameters – vibration displacements of the load-bearing vertical and horizontal elements of the facade system from an artificial vibration exciter were determined using the Vibran-2.0 vibro-analyzer.

Technical characteristics of the Vibran-2.0 vibro-analyzer:

- Vibration displacement measurement range – 0.01–10 mm;
- Operating frequency range – 0.5–1000 Hz.

To determine relative deformations and stresses in conjunction with the vibro-analyzer, a universal strain gauge station was used. Relative deformations were recorded in dangerous sections of the brackets and in steel profiles (at fastening points and in the middle of spans).

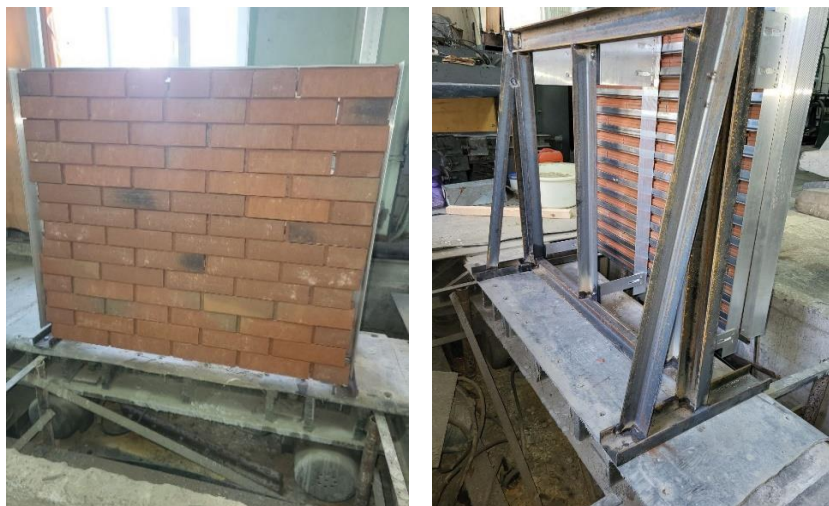


Fig. 1. Fragment of the facade system

The test results are presented in Table 1.

Table 1 – Test results of the facade system sample fragment

| № | Sensor Placement | Unit of measurement | Value |
|---|---|---------------------|-------|
| 1 | Vertically, at the middle of the sample | mm | 2.136 |
| 2 | Vertically, at the middle of the sample | mm | 0.085 |
| 4 | Vertically, at the middle of the sample | mm | 0.48 |
| 4 | Horizontally, at the middle of the sample | mm | 1.974 |
| 5 | Horizontally, at the middle of the span | mm | 0.098 |
| 6 | Horizontally, at the middle of the span | mm | 4.175 |
| 7 | Stresses in brackets | MPa | 28.5 |
| 8 | Stresses in profile | MPa | 83.1 |

To compare the results obtained from the response spectra, a dynamic analysis of the fragment was performed, and an analysis of the stress-strain state was conducted, including a check for potential clinker detachment.

A fragment of the calculation model for one facade system package is shown in Fig. 2. The calculation results are presented as stress fields for the most loaded section of the facade system. Stresses were determined using the Huber-Hencky-Mises criterion (Fig. 3).

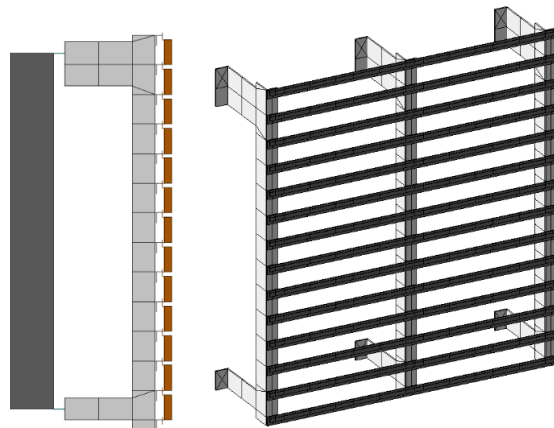


Fig. 2. General view of the test package

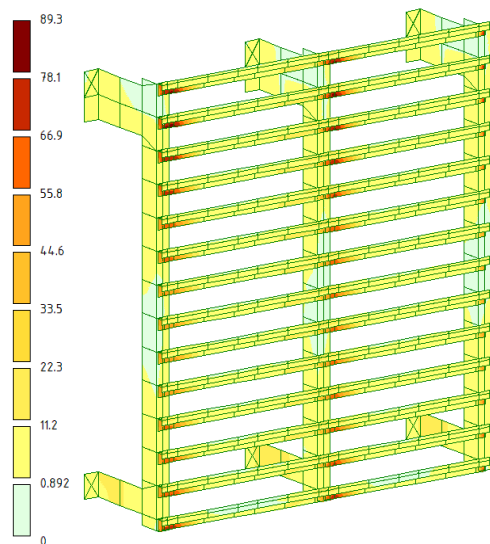


Fig. 3. Stress in fastening elements, MPa

It has been established that during the experimental tests, the facade system maintained its integrity, no individual tiles fell off, and the connection nodes of the elements remained reliable. The obtained stresses coincide with the calculation results, with an error not exceeding 7%.

Calculation of the Facade System for Seismic Load under Real-World Conditions

The research involves calculating the "KMD VF" ventilated facade system with RONSON 250×65×22 Busum facade tiles for conditions of combined operation with a multi-apartment residential building with a total height of 36 m.

Input Data for Seismic Load Calculation of the Facade System:

- Consequence Class (Building Responsibility Class) – CC-3.
- Wind Load – 370 Pa.
- Seismic Zoning Map – OSR-2004-S (1%).
- Soil Category by Seismic Properties – III.
- Seismicity of the Construction Site – 8.
- Design Seismicity according to Table 1.1 [17] – 9.
- Seismic Load Direction – X, Y, or Z.

Description of the Calculation Methodology. The calculation of the facade system, considering seismic effects, was performed in the Lira-CAD software environment using the spectral method in accordance with clause 2.3 [17] and [18-23].

To determine the design values of horizontal seismic loads on the facade system, a design scheme in the form of a spatial multi-mass elastically-deformable cantilever rod was adopted. This rod is rigidly fixed at its base, carries concentrated masses of weight Q_k , and undergoes oscillatory motion in one of the x, y, or z directions (Fig. 4, a).

The calculation model (Fig. 4, b) was constructed using volume finite elements (FE) to model the conditional building and clinker elements, shell FEs for brackets and spans, and also special FEs for modeling the connections between clinker and spans, spans and brackets, and brackets and the building. Separately, a fragment of the calculation model for one facade system package is shown in Fig. 5.

The design value of the horizontal seismic load S_{ki} , applied to point k according to the i-th natural vibration mode of the system, is determined by the formula:

$$S_{ki} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot S_{0ki} , \tag{1}$$

where: k_1 – coefficient accounting for inelastic deformations and local damage to building elements (Table 2.3 [17]) – 1.0 (damage or inelastic deformations are not allowed);

k_2 – structure responsibility coefficient (Table 2.4 [17]) – 1.0 (residential, public, and industrial buildings);

k_3 – floor coefficient – 1.3 (10 floors).

S_{0ki} – horizontal seismic load for the i-th natural vibration mode of the structure.

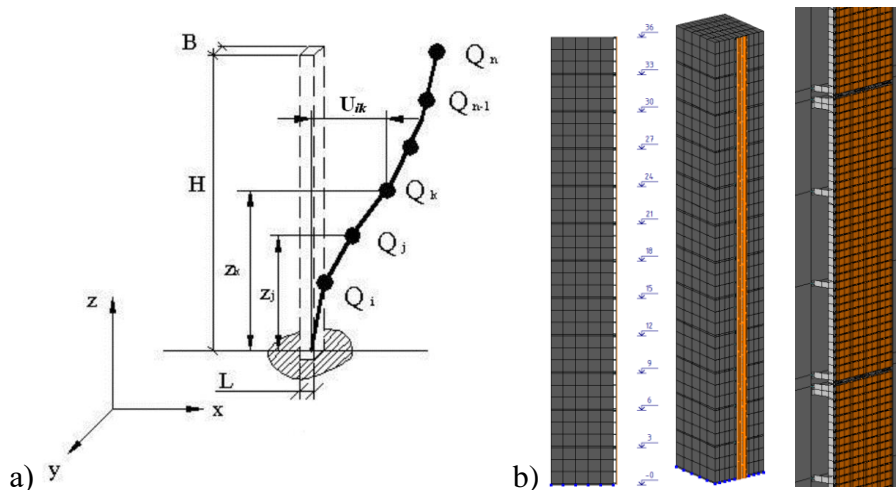


Fig. 4. Calculation scheme of the spectral method

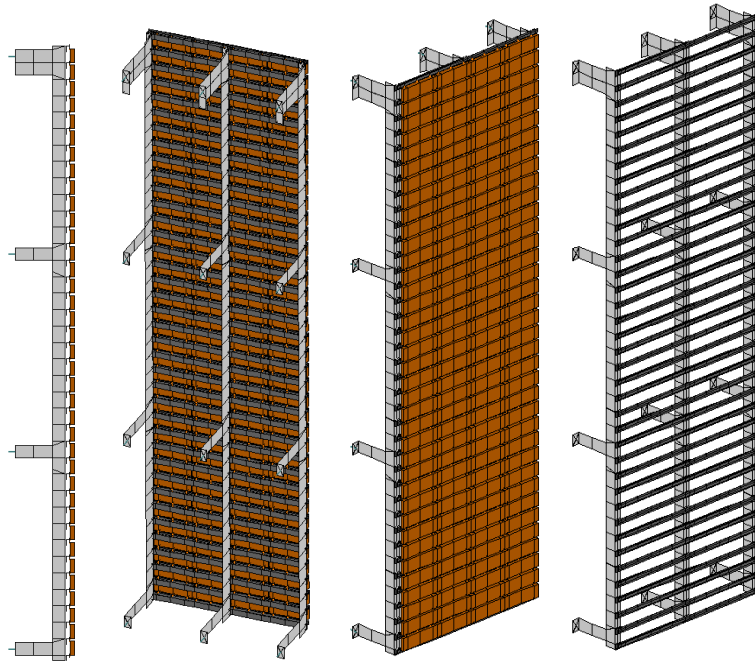


Fig. 5. General view of a model of one facade system package

Horizontal seismic load S_{0ki} according to the i -th form of natural oscillations of the structure, which is determined by the elastically deformed system by the formula:

$$S_{0ki} = Q_k \cdot a_0 \cdot k_{rp} \cdot \beta_i \cdot \eta_{ki} , \quad (2)$$

where: Q_k – load corresponding to the mass determined by the program as concentrated at point k , taking into account the coefficients according to Table 2;

a_0 – relative acceleration of the soil (taken to be equal to 0.4);

k_{rp} – coefficient taking into account nonlinear soil deformation – 0.7 (for soil category III and seismicity 9);

β_i – spectral coefficient of dynamicity corresponding to the i -th form of natural oscillations of the structure (determined by the program);

η_{ki} – coefficient that depends on the form of the natural oscillations of the system or structure and on the location of the load (determined by the program).

Table 2 – Design load combinations

| № | Coefficients of coupling | | | | |
|---|--------------------------|-----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | Own weight | Wind load | Seismic in the direction Y | Seismic in the direction X | Seismic in the direction Z |
| 1 | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1.0 | 1.0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1.0 | 0 | 1.0 | 0 | 0 |
| 4 | 1.0 | 0 | 0 | 1.0 | 0 |
| 5 | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 1.0 |
| 6 | 0.9 | 0.5 | 1.0 | 0 | 0 |
| 7 | 0.9 | 0.5 | 0 | 1.0 | 0 |
| 8 | 0.9 | 0.5 | 0 | 0 | 1.0 |

The calculation results are presented as stress fields for the most heavily loaded section of the facade system. Strength assessment was performed using equivalent stresses, determined with the Huber-Hencky-Mises energy theory (Fig. 6). Forces at the contacts between clinker and spans, spans and brackets, and brackets and the building are taken according to the corresponding special finite element of the model.

The summarized results are presented in Table 3. The load-bearing capacity indicators are presented as a coefficient, which indicates the degree of strength exhaustion. An allowable coefficient value of no more than 1.0 (or 100% exhaustion) is considered acceptable.

Table 3 – Summary of calculation results

| № | Load-bearing capacity indicator | Estimated force, kg | Stress, MPa | Load capacity, kg | Design resistance, MPa | Exhaustion rate |
|---|---|---------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------------|
| 1 | Pull-out force of a dowel with a screw | 44 | - | 150...500 | - | 0.30...0.10 |
| 2 | Rivet pull-out force 3.2×8 | 4.2 | - | 25...45 | - | 0.17...0.10 |
| 3 | Clinker separation force from the run profile | 2.4 | - | 5.6 | - | 0.43 |
| 4 | Stress in brackets | - | 49 | - | 120 | 0.41 |
| 5 | Stress in the profile | - | 150 | - | 230 | 0.65 |

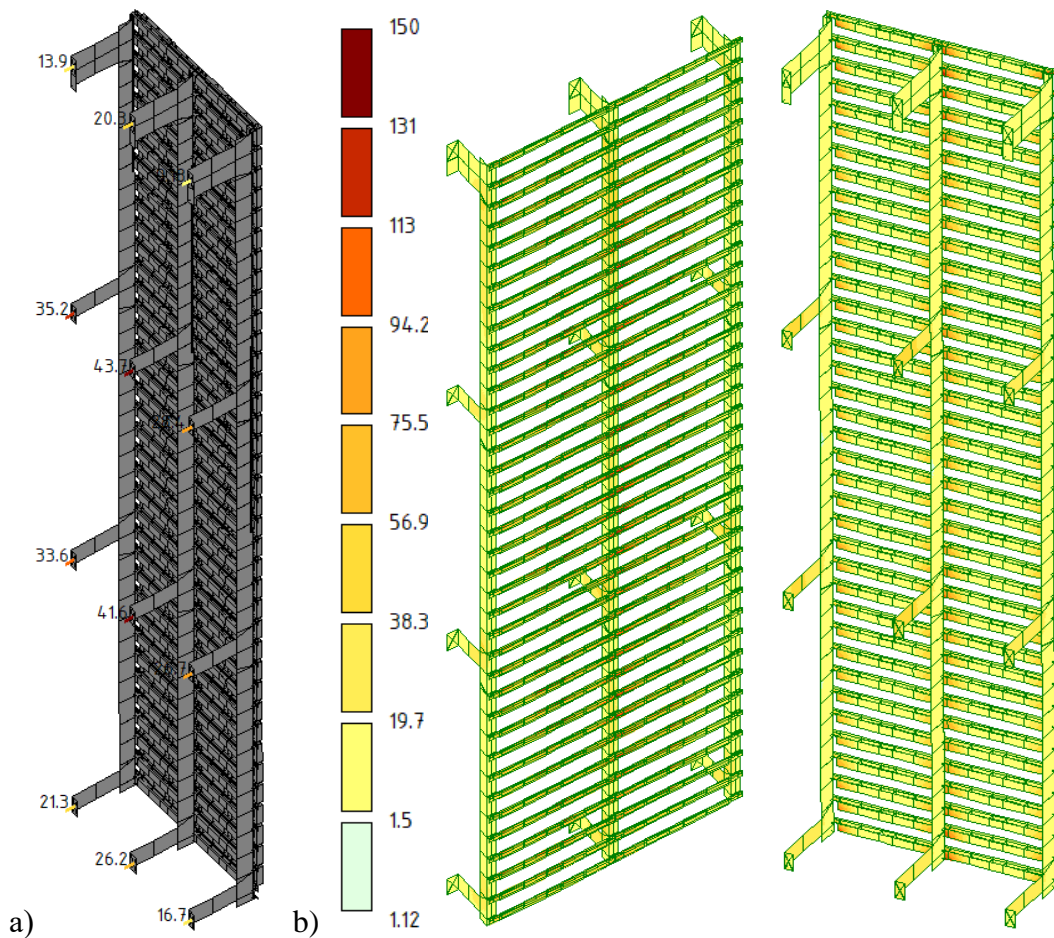


Fig. 6. Pull-out force of dowels with a screw (a), kg, stress in the fastening elements (b), MPa

Conclusions. Based on the comprehensive studies of the facade system, which included both experimental laboratory tests of its fragment and numerical modeling for seismic effects, the following key conclusions can be drawn:

1. Resistance to Vibrational and Dynamic Impacts. Experimental tests demonstrated the high

survivability of the facade system at a load level corresponding to approximately 60% of a 9-point seismic event. The system maintained its integrity, no individual tiles fell off, and the connection nodes of the elements remained reliable. The stresses obtained during the experiments coincide with the results of numerical calculations, with an error not exceeding 7%. This confirms the adequacy of the developed calculation scheme and methodology, which is the basis for the reliability of further predictions.

2. Seismic Resistance and Strength Margins. The spectral calculation of the facade system, operating jointly with a 36m high multi-story building, for seismic effects established that the exhaustion of the system's overall load-bearing capacity from a 9-point seismic event does not exceed 65%. This means that a significant strength margin of 35% is maintained. Furthermore, protection against the falling of individual tiles is ensured with a margin of 57%. These quantitative indicators demonstrate the high level of reliability of the system under seismic loads.

3. Feasibility of Application in Seismic Zones of Ukraine. Based on the obtained results, which confirm both experimental survivability and sufficient strength margins in seismic load calculations, it is concluded that the use of "KMD VF" ventilated facade systems with RONSON 250×65×22 Busum facade tiles is possible and advisable for construction in seismic zones of Ukraine. This solution is justified in terms of safety and compliance with building codes.

References

- [1] R. Nascimbene, "Editorial: Seismic vulnerability assessment of structural and non-structural components in industrial plants", *Front. Built Environ.* vol. 9, 1289404, 2023. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1289404>.
- [2] UK Research and Innovation (UKRI). Project: ISCREANE: Innovative Seismic Assessment of Critical Non-Structural Elements. [Online]. Available: <https://gtr.ukri.org/projects?ref=EP%2FZ002842%2F1>. Accessed on: June 17, 2024.
- [3] B. Samali, P. Abtahi, "Evaluation of the effect of smart façade systems in reducing dynamic response of structures subjected to seismic loads", *Earthquakes and Structures*, vol. 11, Iss. 6, pp. 983-1000, 2016. <https://doi.org/10.12989/eas.2016.11.6.983>.
- [4] L. Di Sarno, G. Magliulo, D. D'Angela, E. Cosenza, "Experimental assessment of the seismic performance of hospital cabinets using shake table testing", *Earthquake Engng Struct Dyn*, vol. 48, pp. 103-123, 2019. <https://doi.org/10.1002/eqe.3127>.
- [5] O. Coppola, G. De Luca, A. Franco, A. Bonati, "Experimental tests for seismic assessment of ventilated façades", *Procedia Structural Integrity*, vol. 44, pp. 758-765, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.099>.
- [6] S. D'Amore, S. Bianchi, J. Ciurlanti, et al., "Seismic assessment and finite element modeling of traditional vs innovative point fixed glass facade systems (PFGFS)", *Bull Earthquake Eng.*, vol. 21, pp. 2657-2689, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01622-0>.
- [7] F. El-Wahed Mohamed Abd, S. Gaawan Moustafa, M. Yehia Mohamed, "Experimental and Finite Element Analysis on Seismic Performance of Composite Shear Walls with Embedded Cold-Formed C-Shape Steel Section", *Trends in advanced sciences and technology*, vol. 2, Article 1, 2025. <https://doi.org/10.62537/2974-444X.1029>.
- [8] C. Aparicio-Fernández, J.-L. Vivancos, P. Ferrer-Gisbert, R. Royo-Pastor, "Energy performance of a ventilated façade by simulation with experimental validation", *Applied Thermal Engineering*, vol. 66, Issues 1–2, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.041>.
- [9] Y. Henzerkyi, M. Barabash, I. Trusov, L. Pervushova, "Methods of assessing the seismic resistance of building structures and nuclear power plant structures in Lira-SAPR program", *Strength of Materials and Theory of Structures*, vol. 111, 2023. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.125-139>.

- [10] K. Pelletier, C. Wood, J. Calautit, Y. Wu, "The viability of double-skin façade systems in the 21st century: A systematic review and meta-analysis of the nexus of factors affecting ventilation and thermal performance, and building integration", *Building and Environment*, vol. 228, 109870, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109870>.
- [11] M. Ismaiel, Y. Chen, C. Cruz-Noguez, M. Hagel, "Thermal resistance of masonry walls: a literature review on influence factors, evaluation, and improvement", *Journal of Building Physics*, vol. 45(4), pp. 528-567, 2021. <https://doi.org/10.1177/17442591211009549>.
- [12] DBN V.1.2-14:2018. Systema zabezpechennia nadiynosti ta bezpeky budivelnykh ob'yektiv. Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel i sporud. UkrNDIproektstalkonstruksiia. K.: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy, 2018.
- [13] DBN V.1.2-2:2006. «Navantazhennya i vplyvy». UkrNDIproektstalkonstruksiia. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2020.
- [14] DBN V.1.2-6:2021. Osnovni vymohy do budivel i sporud. Mekhanichnyy opir ta stiykist, DP «Derzhavnyy naukovo-doslidnyy instytut budivelnykh konstruktsiy» (NDIBK), K.: Minrehion Ukrainy, 2022.
- [15] DBN V.1.2-9:2021. «Osnovni vymohy do budivel i sporud. Bezpeka i dostupnist pid chas ekspluatatsiyi», DP «Derzhavnyy naukovo-doslidnyy instytut budivelnykh konstruktsiy» (NDIBK), K.: Minrehion Ukrainy, 2022.
- [16] DBN V.1.1-45:2017. «Budivli i sporudy v skladnykh inzhenerno-heolohichnykh umovakh», DP «Derzhavnyy naukovo-doslidnyy instytut budivelnykh konstruktsiy» (NDIBK), K.: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy, 2017.
- [17] DBN V.1.1-12:2014. «Budivnytstvo u seysmichnykh rayonakh Ukrainy», DP «Derzhavnyy naukovo-doslidnyy instytut budivelnykh konstruktsiy» (NDIBK), K.: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy, 2014.
- [18] DSTU B V.2.7-61:2008. Budivelni materialy. Tsekhla ta kameni keramichni ryadovi i lytsevi. Tekhnichni umovy (EN 771-1:2003, NEQ). LvivbudmNDIproekt. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2009.
- [19] DBN V.2.2-41:2019. Vysotni budivli. Osnovni polozhennia. Naukovo-doslidnyi instytut budivelnoho vyrobnytstva (NDIBV). K.: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy, 2019.
- [20] DBN V.2.1-10:2018. Osnovy i fundamente budivel ta sporud. Osnovni polozhennia. DP «Derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut budivelnykh konstruktsiy» (NDIBK). K.: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy, 2018.
- [21] DBN V.2.6-33:2018. Konstruktsiyi zovnishnikh stin iz fasadnoyu teployizolyatsiyeyu. Vymohy do proyektvannya. K.: Minrehion Ukrainy, 2018.
- [22] DSTU-N B V.1.2-17:2016. Nastanova shchodo naukovo-tekhnichnoho monitorynhu budivel i sporud. K.: UKRARKHBUDINFORM, 2018.
- [23] DSTU-N B EN 1998-3:2012. Yevrokod 8. Proyektuvannya seysmostiykykh konstruktsiy. Chastyna 3. Otsinka stanu ta vidnovlennya budivel (EN 1998-3:2005, IDT). Zmina № 1. K.: DP «UkrNDNTs», 2012.

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ НАВІСНИХ ВЕНТИЛЬОВАНИХ ФАСАДІВ
ДО ДИНАМІЧНИХ ТА ВІБРАЦІЙНИХ ВПЛИВІВ

¹Панченко С.В., д.т.н., професор,
panchenko074@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7626-9933

¹Редько І.О., д.т.н., професор,
ihorredko1972@gmail.com, ORCID: 0009-0005-1556-0830

¹Лобяк О.В., к.т.н., доцент,
lobiak_bmg@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9553-4245.

¹Дудін О.А., к.т.н., доцент,
dudin@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6838-1669

¹Український державний університет залізничного транспорту
майдан Фейєрбаха, 7, Харків, 61050, Україна

Анотація. Метою дослідження є визначення стійкості навісних вентиляваних фасадів типу «KMD VF» з оздобленням фасадною плиткою RONSON 250×65×22 Busum під дією вібраційних та динамічних впливів, а також оцінка можливості їх застосування в сейсмоактивних регіонах України. Для цього було проведено розрахункові дослідження напружено-деформованого стану елементів фасадної системи та експериментальні лабораторні випробування її фрагменту.

В рамках дослідження виконано аналіз літератури та технічної документації, розроблено методику експерименту на вібраційному стенді з використанням віброаналізатора та тензометричної станції. Фрагмент фасадної системи розміром 1000×900 мм піддавався вібраційним впливам на вібростенді. Проведено чисельні дослідження фрагменту фасадної системи в ПК Ліра-САПР на дію вібраційних впливів, створених під час експерименту. Встановлено, що розбіжність результатів розрахунків і експериментальних даних не перевищує 7%.

Додатково виконано розрахунок фасадної системи на сеймонавантаження для 36-метрової будівлі в умовах 9-бальної сейсмічності згідно з ДБН В.1.1-12:2014. При створенні розрахункової схеми була прийнята спрощена схема для моделювання будівлі із залученням об'ємних скінченних елементів і геометрично подібна до реальної конструкції фасадна система, побудована скінченними елементами оболонки. Схема навантаження передбачала використання спектрального методу.

Експериментальні випробування показали, що фасадна система зберігає цілісність, падіння плиток не відбувається, а вузли сполучення елементів залишаються надійними навіть при навантаженнях, що відповідають ~ 60% від 9-бальної сейсміки. Розрахунки на сеймонавантаження підтвердили, що вичерпання несучої здатності системи не перевищує 65%, забезпечуючи 35% запасу міцності. Захист від падіння окремих плиток забезпечується із запасом 57%.

На підставі отриманих результатів зроблено висновок про можливість використання навісних вентиляваних фасадів типу «KMD VF» з плиткою RONSON 250×65×22 Busum у сейсмонебезпечних районах України.

Ключові слова: навісні вентилявані фасади, сейсмостійкість, динамічні впливи, вібраційні впливи, фасадна плитка, експериментальні випробування, напружено-деформований стан.

Стаття надійшла до редакції 3.06.2025

Стаття прийнята до друку 9.07.2025

Дата публікації статті 24.09.2025

[This work by](#) © 2025 by [Panchenko S.V., Redko I.O., Lobiak O.V., Dudin O.A.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ БАЛОК, ЩО ОПИРАЮТЬСЯ НА ПРУЖНУ ОСНОВУ ВІНКЛЕРА¹**Перпері А.О.**, к.т.н., доцент,

a.perperi@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7112-6864

¹**Вакуленко В.В.**, аспірант,

91vvv19@gmail.com, ORCID: 0009-0008-4410-7666

¹*Одеська державна академія будівництва та архітектури*
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. В даній публікації розглядаються так звані функціонально градієнтні балки (ФГБ) з властивостями матеріалу, що змінюються уздовж довжини з певним градієнтом. Робота присвячена розробці аналітичного методу розрахунку на згин вказаних балок, що опираються на однорідну суцільну пружну основу Вінклера. Модуль пружності матеріалу та навантаження вважаються довільними змінними неперервними функціями, що залежать від координати серединної осі балки. В основі розробленого авторського методу (АМ) лежить точний розв'язок відповідного звичайного неоднорідного диференціального рівняння згину четвертого порядку зі змінними коефіцієнтами. Невідомі константи інтегрування тут виражені через початкові параметри, які знаходяться після реалізації заданих граничних умов. Фундаментальні функції та частинний розв'язок диференціального рівняння представляються у вигляді рядів по степеням безрозмірного параметру зі змінними коефіцієнтами, які визначаються за допомогою рекурентних інтегральних співвідношень. Для зручності практичного застосування фундаментальні функції та частинний розв'язок рівняння трансформуються до формату степеневих рядів. Тим самим, розрахунок ФГБ на згин зводиться до процедури чисельної реалізації явних аналітичних формул для параметрів напружено-деформованого стану.

На прикладі продемонстровано практичне застосування АМ. Розглянуто призматичну ФГБ, модуль пружності якої змінюється за параболическим законом. Результати розрахунку АМ представлені в чисельному та графічному форматах для випадку, коли лівий кінець балки шарнірно опертий, а правий затиснутий. Отримані чисельні значення трактуються як точні, оскільки розрахунок ґрунтується на точному розв'язку відповідного диференціального рівняння. Наявність такого методу дозволить оцінювати точність розв'язків, отриманих за допомогою різного роду наближених методів. З метою верифікації розрахунків АМ, надані також відповідні розв'язки, які отримані методом скінченних елементів (МСЕ) в ПК ЛІРА-САПР. Порівняння свідчить про валідність АМ.

Ключові слова: функціонально-градієнтна балка, пружна основа, точний розв'язок, аналітичний метод.

Вступ. В наш час широке застосування у різних галузях науки і техніки знаходять конструкції з функціонально-градієнтних матеріалів [1-6]. Так називають композиційні матеріали, які створюються шляхом зміни мікроструктури від одного матеріалу до іншого з заданим градієнтом. Подібні матеріали розробляються таким чином, щоби їм були притаманні певні наперед задані властивості. Наприклад, мова може йти про термічну або корозійну стійкість, пластичність, в'язкість та інші.

Серед великого різноманіття конструкцій, важливим класом є ФГБ з властивостями матеріалу, що змінюються уздовж довжини. Такі композити характеризуються змінними параметрами, такими, як пружність, щільність, теплопровідність та інші. Зокрема, згинальна жорсткість таких балок також буде змінною уздовж довжини. Внаслідок цього, як зазначається в [7], при розрахунках таких балок на коливання важко отримати точні розв'язки із-за змінності коефіцієнтів у відповідному диференціальному рівнянні. З такої ж причини важко

отримати точні розв'язки і при розв'язанні інших завдань, наприклад, при розрахунках вказаних балок на стійкість чи на згин. Напевно саме тому у сучасних дослідженнях, присвячених різного роду розрахункам ФГБ, застосовуються наближені методи. Однак зрозуміло, що тільки точні розв'язки дозволяють отримати інформацію якісного характеру та сформуванню найбільш достовірну картину напружено-деформованого стану балки. Тому проблема аналітичного розрахунку ФГБ, який ґрунтується на точному розв'язку відповідного диференціального рівняння згину, є актуальною.

Дана робота присвячена аналітичному методу розрахунку ФГБ на згин у випадку, коли модуль пружності та навантаження задані будь-якими неперервними функціями.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Серед численних публікацій, присвячених різного роду розрахункам ФГБ на пружній основі слід виділити роботи [8-12].

В статті [8] МСЕ досліджується реакція конічних консольних ФГБ на великі переміщення. Вважається, що матеріал балки має градієнт у поздовжньому напрямку за степеневим законом. Числові результати показують, що реакція балки на великі переміщення визначається законом розподілу матеріалу та коефіцієнтом конусності. Осьове переміщення на вільному кінці балки найбільш чутливе до коефіцієнта конусності, а поперечне переміщення найменше залежить від цього параметра. Також досліджується вплив відношення довжини до висоти балки. Автори [9] представили комплексну теоретичну модель для дослідження згину, стійкості та власних коливань функціонально-градієнтних нанобалок, що опираються на пружну основу, застосувавши нелокальну теорію градієнта деформації. Для балок Тимошенка та Ейлера-Бернуллі у замкненій формі отримані аналітичні вирази для прогинів, частот та критичних сил нанобалок. Порівняння отриманих результатів з раніше відомими даними підтверджують коректність та високу точність запропонованої моделі. В публікації [10] розроблено універсальний чисельний метод для аналізу статичних і динамічних реакцій ФГБ з довільними змінними поперечними перерізами, матеріалами, фундаментами, навантаженнями та загальними граничними умовами. Всі перераховані змінні параметри задачі дискретизуються методом Гауса-Лобатто, а потім апроксимуються рядами по поліномам Чебишева високого порядку. Дискретне рівняння спектральних елементів балки виведено за допомогою рівняння Лагранжа та теорії балок Ейлера-Бернуллі. Для визначення спектральних елементів Чебишева та обробки граничних умов і сумісності між елементами введено проєкційні матриці. Для перевірки запропонованого методу проведено числові експерименти з урахуванням різних неоднорідних матеріалів, граничних умов, фундаментів, поперечних перерізів та навантажень. Збіжність та точність запропонованого методу були перевірені шляхом порівняння результатів розрахунків з розв'язками, знайденими в літературі та отриманими за допомогою МСЕ. У статті [11] представлено новий підхід до аналізу ФГБ з пористістю, що опираються на пружні основи. Запропоновано новий змішаний балочний скінченний елемент що включає узагальнену поперечну жорсткість та параболический розподіл напружень. Запропонований балочний елемент забезпечує швидку збіжність, адже для отримання точних результатів у порівнянні з існуючими моделями достатньо задіяти всього 1-2 елемента. Тому він є надійним числовим інструментом для аналізу ФГБ. Дослідження [12] присвячено аналізу поведінки ФГБ на пружній основі. Балка моделюється з використанням змішаного підходу, де поєднуються параметри зсуву та компоненти напружень як основні змінні, що забезпечує високу точність та швидку збіжність МСЕ. Пружну основу представлено за допомогою моделі Вінклера та дво-параметричної моделі Пастернака. Проводяться дослідження для вивчення впливу співвідношення довжини до товщини, граничних умов, коефіцієнту жорсткості фундаменту та геометричних параметрів на прогини балки. Результати демонструють ефективність і точність змішаного скінчено-елементного підходу для дослідження складної взаємодії між балкою та пружним фундаментом. Дане дослідження надає надійний інструмент для проектування та аналізу функціонально-градієнтних балок на пружній основі.

Отже, для різного роду розрахунків ФГБ на пружній основі застосовують виключно наближені методи. Аналітичний метод для статичного розрахунку ФГБ, в основі якого лежить точний розв'язок відповідного диференціального рівняння, в науковій літературі відсутній.

Мета та завдання. Мета дослідження – розвиток аналітичних методів розрахунку ФГБ, що опираються на пружну основу.

Завдання дослідження:

– розробити аналітичний методу для статичного розрахунку ФГБ сталого перерізу, що опираються на однорідну суцільну пружну основу Вінклера, для випадку довільних неперервно-змінних модуля пружності та навантаження;

– перевірити валідність АМ шляхом порівняння розрахунків для конкретного прикладу з відповідними розв'язками МСЕ.

Матеріали та методика дослідження. При розробці АМ використовувались теорія функціональних рядів та теорія звичайних диференціальних рівнянь. В основі АМ лежить точний розв'язок диференціального рівняння згину ФГБ, який знайдено методом прямого інтегрування [13]. Також застосовувався МСЕ, який реалізовано в ПК ЛІРА-САПР.

Результати досліджень. Розглядається задача про згин ФГБ, що опирається на однорідну суцільну пружну основу Вінклера. Відповідна розрахункова схема зображена на рис. 1, де $q(x)$ – задане розподілене змінне поперечне навантаження, $y(x)$ – прогин (просадка основи), $\varphi(x)$ – кут повороту.

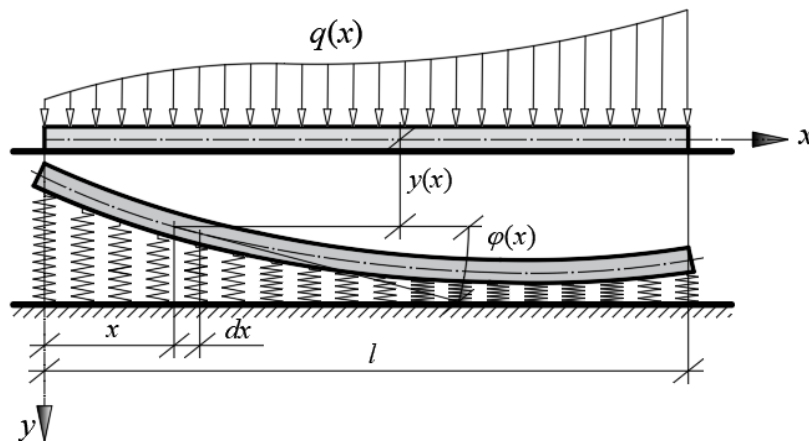


Рис. 1. Розрахункова схема балки

Для модуля пружності балки $E(x)$ та навантаження $q(x)$ приймаємо форму запису:

$$E(x) = E_0 A(x); \quad q(x) = q_0 C(x), \quad (1)$$

де E_0 , q_0 – модуль пружності та навантаження у певній характерній точці балки (наприклад, в перерізі $x=0$), а $A(x)$, $C(x)$ – безрозмірні функції, що виражають відповідно закони зміни модуля пружності та навантаження удовж осі балки.

Диференціальне рівняння згину балки має вигляд:

$$E_0 I (A(x) y''(x))'' + k y(x) = q_0 C(x), \quad (2)$$

де I – момент інерції її поперечного перерізу, k – погонний коефіцієнт постелі. Після визначення з цього рівняння функції прогинів $y(x)$, інші параметри напружено-деформованого стану (НДС) балки, такі як кут повороту $\varphi(x)$, згинальний момент $M(x)$ та поперечна сила $Q(x)$ визначаються за відомими з теорії згину балок формулами:

$$\varphi(x) = y'(x); \quad M(x) = -E_0 I A(x) y''(x); \quad Q(x) = -E_0 I (A(x) y''(x))'. \quad (3)$$

Точний розв'язок диференціального рівняння (2) можна знайти за допомогою методу прямого інтегрування, який розвинуто в [13]. Застосування цього методу проілюстровано у низці публікацій, серед яких відзначимо [14-16]. Зокрема, в [16] побудовано точний розв'язок

диференціального рівняння, подібного (2). Відмінність полягає в тому, що там розглянуто згин балки сталої жорсткості на неоднорідній пружній основі Вінклера. При цьому неоднорідність основи характеризується довільним неперервно-змінним коефіцієнтом постелі. Щоб не повторювати однотипну процедуру методу прямого інтегрування, запишемо тільки кінцеві формули, якими визначається точний розв'язок рівняння (2):

$$y(x) = y(0)X_1(x) + \varphi(0)l X_2(x) - M(0)\frac{l^2}{E_0I} X_3(x) - Q(0)\frac{l^3}{E_0I} X_4(x) + \frac{q_0 l^4}{E_0I} X_5(x); \quad (4)$$

$$X_n(x) = \beta_{n,0}(x) - K\beta_{n,1}(x) + K^2\beta_{n,2}(x) - K^3\beta_{n,3}(x) + \dots \quad (n=1,2,3,4,5); \quad (5)$$

$$K = \frac{kl^4}{E_0I};$$

$$\beta_{n,0}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n-1} \quad (n=1,2); \quad \beta_{n,0}(x) = \frac{1}{l^2} \int_0^x \int_0^x \frac{1}{A(x)} \left(\frac{x}{l}\right)^{n-3} dx dx \quad (n=3,4); \quad (6)$$

$$\beta_{5,0}(x) = \frac{1}{l^4} \int_0^x \int_0^x \frac{1}{A(x)} \int_0^x \int_0^x C(x) dx dx dx dx; \quad (7)$$

$$\beta_{n,k}(x) = \frac{1}{l^4} \int_0^x \int_0^x \frac{1}{A(x)} \int_0^x \int_0^x \beta_{n,k-1}(x) dx dx dx dx \quad (n=1,2,3,4,5) (k=1,2,3,\dots). \quad (8)$$

Важливо зауважити, що функції (5) безрозмірні [13]. Константи інтегрування в (4) виражені через так звані початкові параметри $y(0), \varphi(0), M(0), Q(0)$, які визначатимуться в кожному конкретному випадку із заданих граничних умов.

Знаючи функцію прогинів (4) та користуючись (3), можемо записати формули для визначення інших параметрів НДС балки:

$$\varphi(x) = y(0)\frac{1}{l} \tilde{X}_1(x) + \varphi(0)\tilde{X}_2(x) - M(0)\frac{l}{E_0I} \tilde{X}_3(x) - Q(0)\frac{l^2}{E_0I} \tilde{X}_4(x) + \frac{q_0 l^3}{E_0I} \tilde{X}_5(x); \quad (9)$$

$$M(x) = -y(0)\frac{E_0I}{l^2} \hat{X}_1(x) - \varphi(0)\frac{E_0I}{l} \hat{X}_2(x) + M(0)\hat{X}_3(x) + Q(0)l\hat{X}_4(x) - q_0 l^2 \hat{X}_5(x); \quad (10)$$

$$Q(x) = -y(0)\frac{E_0I}{l^3} \hat{X}_1(x) - \varphi(0)\frac{E_0I}{l^2} \hat{X}_2(x) + M(0)\frac{1}{l} \hat{X}_3(x) + Q(0)\hat{X}_4(x) - q_0 l \hat{X}_5(x), \quad (11)$$

де $\tilde{X}_n(x) = lX'_n(x)$; $\hat{X}_n(x) = l^2 A(x)X''_n(x)$; $\hat{X}_n(x) = l^3 (A(x)X''_n(x))'$ ($n=1,2,3,4,5$) – безрозмірні функції [13].

Після апроксимації функцій $f(x) = 1/A(x)$ та $C(x)$ рядами Маклорена:

$$f(x) = A_0 + A_1\left(\frac{x}{l}\right) + A_2\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \dots + A_j\left(\frac{x}{l}\right)^j + \dots, \quad (12)$$

$$C(x) = C_0 + C_1\left(\frac{x}{l}\right) + C_2\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \dots + C_j\left(\frac{x}{l}\right)^j + \dots, \quad (13)$$

формули (5)-(8) трансформуються до виду, більш зручного для практичного застосування:

$$X_n(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n-1} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k c_{n,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j} \quad (n=1,2,3,4,5); \quad (14)$$

$$c_{n,0,0} = 1; \quad c_{n,0,j} = 0 \quad (n=1,2) (j=1,2,3,\dots); \quad (15)$$

$$c_{n,0,j} = \frac{A_j}{(n+j-2)(n+j-1)} \quad (n=3,4) (j=0,1,2,\dots); \quad (16)$$

$$c_{5,0,j} = \frac{1}{(j+3)(j+4)} \sum_{i=0}^j \frac{A_{j-i} C_i}{(i+1)(i+2)} \quad (j=0,1,2,\dots); \quad (17)$$

$$c_{n,k,j} = \frac{1}{(n+4k+j-2)(n+4k+j-1)} \sum_{i=0}^j \frac{A_{j-i} c_{n,k-1,i}}{(n+4k+i-4)(n+4k+i-3)} \quad (18)$$

$(n = 1, 2, 3, 4, 5) (k = 1, 2, 3, \dots) (j = 0, 1, 2, \dots)$.

Таким чином, формулами (4), (9)-(18) фактично визначено новий аналітичний метод для статичного розрахунку ФГБ на однорідній суцільній пружній основі Вінклера.

Для реалізації розробленого методу створено відповідний програмний код на Visual Basic в програмному середовищі Excel. Тим самим, забезпечено можливість розрахунку ФГБ у програмному режимі.

Приклад. Розглянемо призматичну ФГБ, лівий кінець якої шарнірно опертий, а правий затиснутий (рис. 2). Діюче на балку змінне навантаження задано законом синуса:

$$q(x) = q \left(\frac{l}{2} \right) \sin \frac{\pi x}{l}. \quad (19)$$

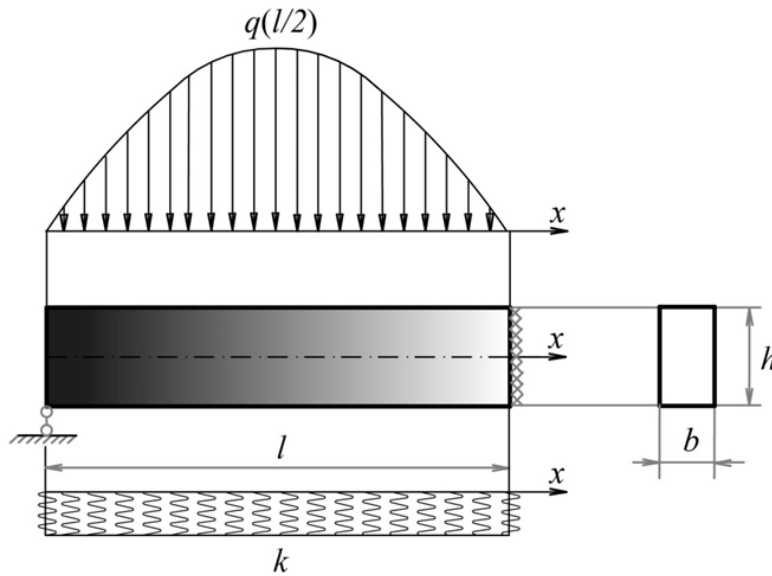


Рис. 2. Розрахункова схема балки

Балка виготовлена з двох компонентів, а саме, з цирконію ZrO_2 та алюмінію Al . Модуль пружності балки змінюється за параболічним законом:

$$E(x) = E_{Zr} - (E_{Zr} - E_{Al}) \left(\frac{x}{l} \right)^2, \quad (20)$$

де E_{Zr} , E_{Al} – відповідно модулі пружності цирконію та алюмінію. Подібні балки знаходять застосування у різних галузях інженерії, в тому числі в аерокосмічному будівництві [10].

Граничні умови у даному випадку запишуться так: $y(0) = 0$; $M(0) = 0$; $y(l) = 0$; $\varphi(l) = 0$. Отже, два початкові параметри $y(0)$, $M(0)$ уже відомі. Інші два $\varphi(0)$, $Q(0)$ знайдемо із системи рівнянь, яку отримаємо після реалізації граничних умов на правому кінці $x=l$, скориставшись (4), (9). В підсумку для початкових параметрів матимемо:

$$y(0) = 0; \quad \varphi(0) = \frac{q_0 l^3}{E_0 I} \frac{X_4(l) \tilde{X}_5(l) - \tilde{X}_4(l) X_5(l)}{X_2(l) \tilde{X}_4(l) - \tilde{X}_2(l) X_4(l)}; \quad M(0) = 0; \quad Q(0) = q_0 l \frac{X_2(l) \tilde{X}_5(l) - \tilde{X}_2(l) X_5(l)}{X_2(l) \tilde{X}_4(l) - \tilde{X}_2(l) X_4(l)}.$$

Виходячи з (1), (19), (20), для даного випадку знаходимо:

$$E(x) = E_0 A(x); \quad E_0 = E_{Zr}; \quad A(x) = 1 - (1 - \delta) \left(\frac{x}{l} \right)^2; \quad \delta = \frac{E_{Al}}{E_{Zr}};$$

$$q_0 = q \left(\frac{l}{2} \right); \quad C(x) = \sin \frac{\pi x}{l}.$$

Далі, скориставшись рядами Маклорена:

$$f(x) = 1 + (1 - \delta) \left(\frac{x}{l}\right)^2 + (1 - \delta)^2 \left(\frac{x}{l}\right)^4 + (1 - \delta)^3 \left(\frac{x}{l}\right)^6 + \dots,$$

$$C(x) = \sin \frac{\pi x}{l} = \frac{\pi x}{l} - \frac{1}{3!} \left(\frac{\pi x}{l}\right)^3 + \frac{1}{5!} \left(\frac{\pi x}{l}\right)^5 - \frac{1}{7!} \left(\frac{\pi x}{l}\right)^7 + \dots,$$

визначаємо коефіцієнти рядів (12), (13). Тут $A_0 = 1$, $C_0 = 0$, а інші значення визначаються в залежності від парності чи непарності індексу j :

$$A_j = 0; C_j = (-1)^{\frac{j+3}{2}} \frac{\pi^j}{j!} \text{ – для непарних значень } j = 1, 3, 5, \dots;$$

$$A_j = (1 - \delta)^{j/2}; C_j = 0 \text{ – для парних значень } j = 2, 4, 6, \dots$$

Зауважимо, що для програмного обчислення коефіцієнтів ряду (13) при непарних j зручніше користуватись рівносильними рекурентними формулами:

$$C_1 = \pi, C_{j+2} = -\frac{\pi^2}{(j+1)(j+2)} C_j \quad (j = 1, 3, 5, \dots).$$

Вихідні дані для розрахунку: довжина балки $l = 4\text{ м}$; ширина підшви балки $b = 0,2\text{ м}$; висота балки $h = 0,3\text{ м}$; $q_0 = 100\text{ кН / м}$; $E_{zr} = 2 \cdot 10^8\text{ кПа}$; $E_{Al} = 7 \cdot 10^7\text{ кПа}$; $k = 1000\text{ кН / м}^2$.

В програмному режимі виконано розрахунок, а саме, для двадцять одного перерізу обчислені значення параметрів НДС балки: прогину $y(x)$, кута повороту $\varphi(x)$, згинального моменту $M(x)$ та поперечної сили $Q(x)$. Результати розрахунку АМ представлені в числовому та графічному форматі (див. табл. 1, 2 та рис. 3, 4). Для порівняння в табл. 1, 2 також надані результати розрахунку МСЕ у ПК ЛІРА-САПР.

Таблиця 1 – Значення кінематичних параметрів

| x | $y(x)$, [мм] | | Відносна похибка, % | $\varphi(x)$, [рад] | | Відносна похибка, % |
|-----|---------------|----------|---------------------|----------------------|-----------|---------------------|
| | АМ | МСЕ | | АМ | МСЕ | |
| 0 | 0,000000 | 0,000000 | 0,00 | 0,001493 | 0,001509 | 1,03 |
| 0,2 | 0,297262 | 0,300332 | 1,03 | 0,001472 | 0,001487 | 1,03 |
| 0,4 | 0,586132 | 0,592172 | 1,03 | 0,001410 | 0,001424 | 1,03 |
| 0,6 | 0,858411 | 0,867220 | 1,03 | 0,001307 | 0,001320 | 1,02 |
| 0,8 | 1,106279 | 1,117568 | 1,02 | 0,001166 | 0,001178 | 1,00 |
| 1 | 1,322493 | 1,335880 | 1,01 | 0,000991 | 0,001000 | 0,98 |
| 1,2 | 1,500569 | 1,515597 | 1,00 | 0,000785 | 0,000793 | 0,93 |
| 1,4 | 1,634976 | 1,651136 | 0,99 | 0,000555 | 0,000560 | 0,87 |
| 1,6 | 1,721323 | 1,738064 | 0,97 | 0,000306 | 0,000308 | 0,68 |
| 1,8 | 1,756556 | 1,773292 | 0,95 | 0,000045 | 0,000044 | 1,67 |
| 2 | 1,739150 | 1,755301 | 0,93 | -0,000219 | -0,000223 | 1,58 |
| 2,2 | 1,669326 | 1,684330 | 0,90 | -0,000477 | -0,000484 | 1,29 |
| 2,4 | 1,549282 | 1,562612 | 0,86 | -0,000719 | -0,000728 | 1,19 |
| 2,6 | 1,383459 | 1,394667 | 0,81 | -0,000933 | -0,000944 | 1,13 |
| 2,8 | 1,178859 | 1,187621 | 0,74 | -0,001105 | -0,001117 | 1,08 |
| 3 | 0,945460 | 0,951599 | 0,65 | -0,001218 | -0,001231 | 1,05 |
| 3,2 | 0,696763 | 0,700295 | 0,51 | -0,001254 | -0,001267 | 1,01 |
| 3,4 | 0,450576 | 0,451777 | 0,27 | -0,001189 | -0,001200 | 0,97 |
| 3,6 | 0,230190 | 0,229678 | 0,22 | -0,000990 | -0,000999 | 0,93 |
| 3,8 | 0,066258 | 0,065116 | 1,72 | -0,000615 | -0,000621 | 0,87 |
| 4 | 0,000000 | 0,000000 | 0,00 | 0,000000 | 0,000000 | 0,00 |

Таблиця 2 – Значення силових параметрів

| x | $M(x), [кНм]$ | | Відносна похибка, % | $Q(x), [кН]$ | | Відносна похибка, % |
|-----|---------------|-------------|---------------------|--------------|-------------|---------------------|
| | АМ | МСЕ | | АМ | МСЕ | |
| 0 | 0,000000 | 0,000000 | 0,00 | 94,946557 | 96,035896 | 1,15 |
| 0,2 | 18,886709 | 19,103294 | 1,15 | 93,408780 | 94,477623 | 1,14 |
| 0,4 | 37,160826 | 37,585827 | 1,14 | 88,833209 | 89,841003 | 1,13 |
| 0,6 | 54,224802 | 54,842083 | 1,14 | 81,332187 | 82,240166 | 1,12 |
| 0,8 | 69,510798 | 70,296745 | 1,13 | 71,089873 | 71,862152 | 1,09 |
| 1 | 82,494625 | 83,418823 | 1,12 | 58,357698 | 58,962337 | 1,04 |
| 1,2 | 92,708602 | 93,734726 | 1,11 | 43,448174 | 43,858196 | 0,94 |
| 1,4 | 99,753031 | 100,839928 | 1,09 | 26,727194 | 26,921391 | 0,73 |
| 1,6 | 103,305991 | 104,408890 | 1,07 | 8,605034 | 8,568649 | 0,42 |
| 1,8 | 103,131219 | 104,203102 | 1,04 | -10,473734 | -10,748409 | 2,62 |
| 2 | 99,083895 | 100,076920 | 1,00 | -30,041142 | -30,554564 | 1,71 |
| 2,2 | 91,114179 | 91,981148 | 0,95 | -49,617282 | -50,362499 | 1,50 |
| 2,4 | 79,268435 | 79,964287 | 0,88 | -68,722005 | -69,684860 | 1,40 |
| 2,6 | 63,688105 | 64,171272 | 0,76 | -86,886582 | -88,046265 | 1,33 |
| 2,8 | 44,606287 | 44,839977 | 0,52 | -103,665003 | -104,994797 | 1,28 |
| 3 | 22,342120 | 22,295361 | 0,21 | -118,644611 | -120,113243 | 1,24 |
| 3,2 | -2,706881 | -3,058488 | 12,99 | -131,455793 | -133,029190 | 1,20 |
| 3,4 | -30,074295 | -30,748241 | 2,24 | -141,780404 | -143,423981 | 1,16 |
| 3,6 | -59,235811 | -60,242874 | 1,70 | -149,358670 | -151,040604 | 1,13 |
| 3,8 | -89,621436 | -90,966637 | 1,50 | -153,994247 | -155,689453 | 1,10 |
| 4 | -120,628513 | -122,312965 | 1,40 | -155,557094 | -157,252869 | 1,09 |

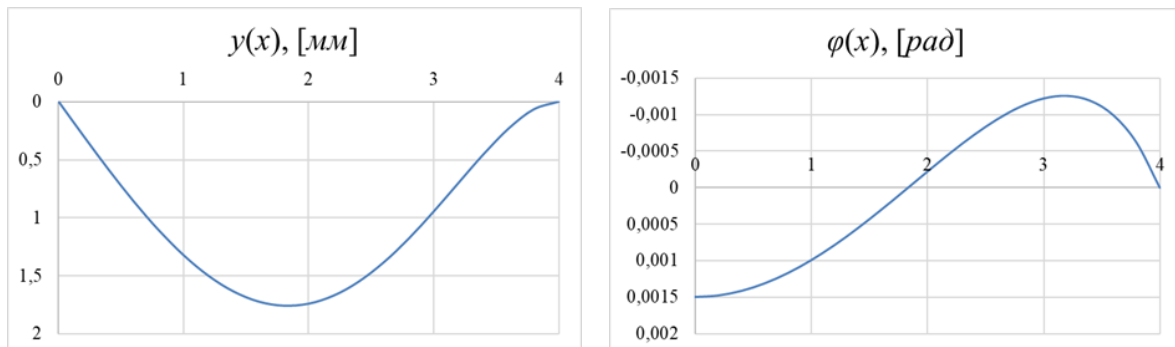


Рис. 3. Епюри кінематичних параметрів

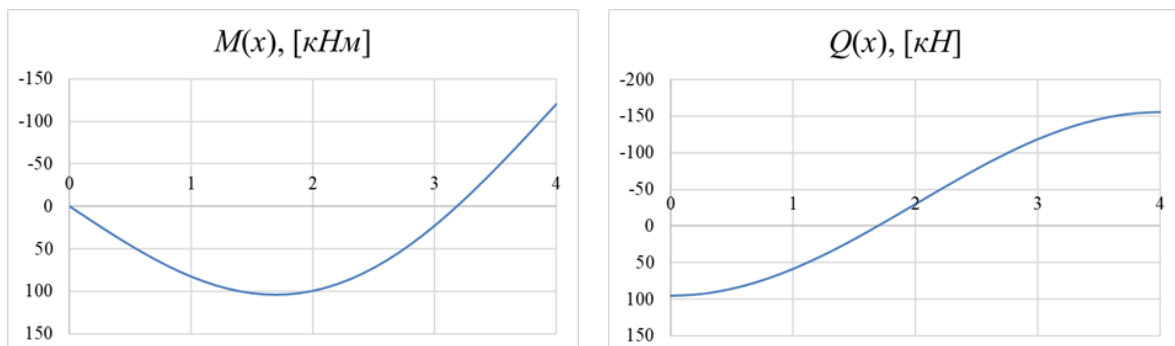


Рис. 4. Епюри силових параметрів

Висновки:

1. Запропонований АМ є ефективним у обчислювальному відношенні та дає можливість отримувати точні результати для статичних розрахунків ФГБ. Він не потребує дискретизації

конструкції та є реальною альтернативою застосуванню наближених методів при розв'язанні даного класу задач.

2. Ґрунтуючись на точному розв'язку, АМ дозволяє отримати більш достовірну картину НДС балки порівняно з наближеними методами. Впровадження такого методу в інженерну практику забезпечить більшу точність розрахунків.

3. Порівняння отриманих розрахунків з відповідними розв'язками, знайденими МСЕ у ПК ЛІРА-САПР засвідчує валідність АМ.

4. Перспективи подальших досліджень автори пов'язують із застосування АМ для статичних розрахунків реальних ФГБ з різними законами зміни коефіцієнта пружності та навантаження: лінійними, поліноміальними, степеневими, експоненціальними та іншими.

Література

1. Calim, F.F. Transient analysis of axially functionally graded Timoshenko beams with variable cross-section. *Composites Part B: Engineering*. 2016. 98. 472–483. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.040>

2. Shafiei, N., Kazemi, M., & Ghadiri, M. Nonlinear vibration of axially functionally graded tapered microbeams. *International Journal of Engineering Science*. 2016. 102. 12-26. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2016.02.007>

3. Lee, J.W., & Lee, J.Y. Free vibration analysis of functionally graded Bernoulli-Euler beams using an exact transfer matrix expression. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017. 122. 1-17. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.01.011>

4. Su, H., Banerjee, J.R., & Cheung, C.W. Dynamic stiffness formulation and free vibration analysis of functionally graded beams. *Composite Structures*. 2013. 106. 854-862. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.029>

5. Jing, L.L., Ming, P.J., Zhang, W.P., Fu, L.R., & Cao, Y.P. Static and free vibration analysis of functionally graded beams by combination Timoshenko theory and finite volume method. *Composite structures*. 2016. 138. 192-213. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.027>

6. Ait Atmane, H., Tounsi, A., Meftah, S.A., & Belhadj, H.A. Free vibration behavior of exponential functionally graded beams with varying cross-section. *Journal of Vibration and Control*. 2011. 17(2). 311-318. URL: <https://doi.org/10.1177/1077546310370691>

7. Cao, D., Wang, B., Hu, W., & Gao, Y. Free vibration of axially functionally graded beam. *Mechanics of functionally graded materials and structures*. IntechOpen. 2020. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.85835>

8. Nguyen, D. K. Large displacement response of tapered cantilever beams made of axially functionally graded material. *Composites Part B: Engineering*. 2013. 55. 298–305. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.024>

9. Hieu, D.V., Chan, D.Q., & Sedighi, H.M. Nonlinear bending, buckling and vibration of functionally graded nonlocal strain gradient nanobeams resting on an elastic foundation. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2021. 16(3). 327-346. URL: <https://doi.org/10.2140/jomms.2021.16.327>

10. Liu, H., Huang, Y., & Zhao, Y. A unified numerical approach to the dynamics of beams with longitudinally varying cross-sections, materials, foundations, and loads using Chebyshev spectral approximation. *Aerospace*. 2023. 10(10). 842. URL: <https://doi.org/10.3390/aerospace10100842>

11. Ghazwani, M.H. New enriched beam element for static bending analysis of functionally graded porous beams resting on elastic foundations. *Mechanics of Solids*. 2023. 58(5). 1878-1893. URL: <https://doi.org/10.3103/S0025654423600885>

12. Kanĭ, D., Bab, Y., Kutlu, A., & Omurtag, M. H. Mixed finite element formulation for functionally graded beams resting on elastic foundation using HSDT. In *4th international civil engineering & architecture conference* (pp. 2177–2183). Golden Light Publishing. 2025. URL: https://doi.org/10.31462/icearc2025_ce_sme_531

13. Крутій Ю. С. Розробка методу розв'язання задач стійкості і коливань деформівних систем зі змінними неперервними параметрами: дис. д-ра техн. наук: 01.02.04. Луцьк, 2016. 273 с.

14. Krutii, Y., Suriyaninov, M., & Vandynskyi, V. Exact solution of the differential equation

of transverse oscillations of the rod taking into account own weight. *MATEC Web of Conferences*. 2017. 116, 02022. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602022>

15. Krutii, Y.S. Construction of a solution of the problem of stability of a bar with arbitrary continuous parameters. *Journal of Mathematical Sciences*. 2018. 231(5). 665–677. URL: <https://doi.org/10.1007/s10958-018-3843-8>

16. Krutii, Y., Surianinov, M., Petrash, S., & Yezhov, M. Development of an analytical method for calculating beams on a variable elastic Winkler foundation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1162(1). 012009. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1162/1/012009>

References

- [1] F.F. Calim, "Transient analysis of axially functionally graded Timoshenko beams with variable cross-section", *Composites Part B: Engineering*, 98, 472–483, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.040>
- [2] N. Shafiei, M. Kazemi, & M. Ghadiri, "Nonlinear vibration of axially functionally graded tapered microbeams", *International Journal of Engineering Science*, 102, 12–26, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2016.02.007>
- [3] J.W. Lee, & J.Y. Lee, "Free vibration analysis of functionally graded Bernoulli-Euler beams using an exact transfer matrix expression", *International Journal of Mechanical Sciences*, 122, 1–17, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.01.011>
- [4] H. Su, J.R. Banerjee, & C.W. Cheung, "Dynamic stiffness formulation and free vibration analysis of functionally graded beams", *Composite Structures*, 106, 85–862, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.029>
- [5] L.L. Jing, P.J. Ming, W.P. Zhang, L.R. Fu, & Y.P. Cao, "Static and free vibration analysis of functionally graded beams by combination Timoshenko theory and finite volume method", *Composite structures*, 138, 192–213, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.027>
- [6] H. Ait Atmane, A. Tounsi, S.A. Meftah, & H.A. Belhadj, "Free vibration behavior of exponential functionally graded beams with varying cross-section", *Journal of Vibration and Control*, 17(2), 311–318, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/1077546310370691>
- [7] D. Cao, B. Wang, W. Hu, & Y. Gao, "Free vibration of axially functionally graded beam". *Mechanics of functionally graded materials and structures*, IntechOpen, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/intechopen.85835>
- [8] D.K. Nguyen, "Large displacement response of tapered cantilever beams made of axially functionally graded material", *Composites Part B: Engineering*, 55, 298–305, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.024>
- [9] D.V. Hieu, D.Q. Chan, & H.M. Sedighi, "Nonlinear bending, buckling and vibration of functionally graded nonlocal strain gradient nanobeams resting on an elastic foundation", *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 16(3), 327–346, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2140/jomms.2021.16.327>
- [10] H. Liu, Y. Huang, & Y. Zhao, "A unified numerical approach to the dynamics of beams with longitudinally varying cross-sections, materials, foundations, and loads using Chebyshev spectral approximation", *Aerospace*, 10(10), 842, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/aerospace10100842>
- [11] M.H. Ghazwani, "New enriched beam element for static bending analysis of functionally graded porous beams resting on elastic foundations", *Mechanics of Solids*, 58(5), 1878–1893, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3103/S0025654423600885>
- [12] D. Kaniğ, Y. Bab, A. Kutlu, & M.H. Omurtag, "Mixed finite element formulation for functionally graded beams resting on elastic foundation using HSDT", In *4th international civil engineering & architecture conference* (pp. 2177–2183). Golden Light Publishing, 2025. [Online]. Available: https://doi.org/10.31462/icearc2025_ce_sme_531
- [13] Yu.S. Krutii, Rozrobka metodu rozviazannia zadach stiičnosti i kolyvan deformivnykh system zi zminnyimi neperervnyimi parametramy: dys. d-ra tekhn. nauk: 01.02.04. Lutsk, 2016.

- [14] Y. Krutii, M. Suriyaninov, & V. Vandynskiyi, "Exact solution of the differential equation of transverse oscillations of the rod taking into account own weight", *MATEC Web of Conferences*, 116, 02022, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602022>
- [15] Y.S. Krutii, "Construction of a solution of the problem of stability of a bar with arbitrary continuous parameters", *Journal of Mathematical Sciences*, 231(5), 665–677, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10958-018-3843-8>
- [16] Y. Krutii, M. Surianinov, S. Petrash, & M. Yezhov, "Development of an analytical method for calculating beams on a variable elastic Winkler foundation", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1162(1), 012009, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1162/1/012009>

AN ANALYTICAL METHOD FOR THE ANALYSIS OF FUNCTIONALLY GRADED BEAMS RESTING ON A WINKLER ELASTIC FOUNDATION

¹**Perperi A.**, Ph.D., Associate Professor,
a.perperi@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7112-6864

¹**Vakulenko V.**, graduate student,
91vvv19@gmail.com, ORCID: 0009-0008-4410-7666

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
4, Didrihsona str., Odesa, Ukraine, 65029

Abstract. This publication addresses the analysis of so-called functionally graded beams (FGBs), whose material properties vary along their length according to a specified gradient. The study is devoted to the development of an analytical method (AM) for bending analysis of such beams resting on a homogeneous, continuous Winkler elastic foundation. The material's modulus of elasticity and the external load are assumed to be arbitrary, continuously varying functions dependent on the coordinate of the beam's neutral axis. The proposed method is based on an exact solution to the corresponding fourth-order ordinary differential equation of bending with variable coefficients. The unknown integration constants are expressed in terms of initial parameters, which are determined by applying the prescribed boundary conditions. The fundamental functions and the particular solution of the differential equation are represented as power series in a dimensionless parameter, with variable coefficients obtained through recursive integral relations. For practical convenience, the fundamental functions and the particular solution are transformed into power series format. This reduces the bending analysis of FGBs to a numerical implementation of explicit analytical expressions for stress-strain state parameters.

A numerical example demonstrates the practical application of the AM. A prismatic FGB with a parabolically varying modulus of elasticity is considered. The AM results are presented in both numerical and graphical formats for the case where the left end of the beam is simply supported and the right end is fixed. The obtained numerical values are treated as exact, since the analysis is based on an exact solution of the governing differential equation. The availability of such a method enables the assessment of the accuracy of solutions obtained using various approximate methods. For verification purposes, corresponding solutions obtained by the Finite Element Method (FEM) using the LIRA-SAPR software are also provided. The comparison confirms the validity of the proposed analytical method.

Keywords: functionally graded beam, elastic foundation, exact solution, analytical method.

Стаття надійшла до редакції 18.08.2025

Стаття прийнята до друку 13.09.2025

Дата публікації статті 24.09.2025

This work by © 2025 by Перпері А.О., Вакуленко В.В. is licensed under CC BY 4.0

FORMATION OF CEMENT STONE MICROSTRUCTURE IN THE PRESENCE OF COMPLEX CHEMICAL ADMIXTURES

¹**Sopov V.P.**, Dr.Sc., Professor,
vsopov@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1908-0421
¹**Andrukh S.L.**, PhD, Associate Professor,
sl_a@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5041-885X
¹*Sumy National Agrarian University*
160 Gerasima Kondratieva Str., Sumy, 40000, Ukraine

Abstract. This article experimentally investigates the possibilities of technological regulation of cement stone and concrete microstructure parameters through the introduction of chemical admixtures of various natures. Based on studies concerning the influence of chemical admixtures on cement hydration processes and cement stone microstructure, a comparative evaluation of the hardening and pore formation of cement stone with accelerating, plasticizing, and complex admixtures was performed.

Specifically, the study focused on the impact of complex chemical admixtures, including a superplasticizer like C-3 (likely a naphthalene sulfonate-based type) and LST (lignosulfonate) combined with accelerators such as NaCl or KCl, Na₂CO₃, K₂CO₃, Na₂SO₄, K₂SO₄ on the pore formation characteristics during the hardening of two types of cement: Portland cement PC CEM I 42.5R and slag Portland cement SPC CEM II B-S 32.5 R. These cements differ in their mineral composition, slag content, and consequently, their hydration rate and structure formation.

It was established that cement stone, whose porosity is characterized by a minimal pore radius and an optimal ratio between the volumes of gel pores and capillary pores, can be achieved through the complex application of an accelerator and a plasticizer. The synergistic effect of the superplasticizer reducing the water-cement ratio and improving particle dispersion, alongside the chloride accelerator speeding up early hydration, contributes to this refined pore structure.

Furthermore, a novel approach for evaluating the effectiveness of modifying the cement stone structure is proposed using the coefficient K_{ef} , defined as the ratio between the volumes of gel pores and capillary pores (ratio of dynamic microstructural indices). This quantitative information regarding the cement stone's microstructure and the limits of its regulation under the influence of internal and external factors allowed for the formulation of a concept regarding the possibilities of achieving specified concrete properties by modifying the corresponding parameters of the cement stone's microporosity.

Keywords: cement stone, microstructure, microporosity, chemical admixtures, structure formation, pore radius, pore size distribution.

Introduction. The pore formation process in cementitious materials is quite complex due to the presence of two developing, interacting structures: hydrosulfoaluminate and hydrosilicate. Hydrosilicates and calcium hydroxide play the main structure-forming role, constituting the bulk of the cementitious new formations. Despite the vast morphological diversity of other hydrated new formations within the cementitious material, their influence on certain physical and mechanical properties is deterministic and can be predicted in advance.

The primary properties of cementitious material – strength, permeability, frost resistance, etc. – are determined by the ensemble of micropores with a corresponding size distribution. Changes in pore sizes within the range of 2 to 100 nm can drastically affect the properties of the cementitious material, thus allowing for control over the nature of structure formation during the hardening phase. One of the levers for controlling the structure formation of cementitious material is the application of chemical and mineral admixtures, which in a specific way influence the course of hydration and hardening.

Analysis of Recent Research and Publications. The developmental trends in modern concrete technology are rooted in the increasing scientific intensity of concrete science. This field, in turn, is

progressively integrating the principles and methodologies of physical and colloid chemistry, physics, and advanced simulation and statistical modeling techniques [1-2]. High indicators of strength, density, and durability in concrete are achieved at the microstructure level by incorporating highly effective chemical, mineral, and complex admixtures as crucial components. This approach enables the regulation of concrete properties by altering the ratio of capillary and gel microporosity within the cement paste structure and at the aggregate-cement paste interface [3-4].

The presence of pores in cement paste, ranging from 1 to 1000 nm in size and partially or completely filled with a liquid phase or vapor-air mixture, complicates their investigation. This is further compounded by the heterogeneous interaction of solid, liquid, and gaseous components, the diversity of their forms, the anisotropy of pore characteristics, and potential energetic changes at phase boundaries. Consequently, various methods are required for studying pore structure across different pore size distribution intervals (e.g., mercury porosimetry, nitrogen adsorption, thermoporosimetry). This also limits the methodological capabilities for quantitatively assessing the parameters of the evolving microstructure, the dispersity and strength of the solid phase of cement paste, the characteristics of bond forms, and changes in the indicators of pore liquid phase transitions under temperature or humidity influences, chemical, and other types of aggression [5-6].

One of the key factors for designing and producing concrete with desired properties, enhanced durability, and resistance to aggressive environments is the microstructure of the cement paste [7]. Currently, the primary method for regulating the properties of concrete mixtures and hardened concrete is the use of chemical and mineral admixtures. Chemical admixtures enable the targeted modification of the cement paste microstructure, which directly impacts the mechanical properties of concrete, including compressive strength, flexural tensile strength, elastic modulus, and deformation resistance [8-11].

Modifying the fundamental characteristics of the cement paste pore structure through chemical admixtures significantly influences concrete durability. Its parameters (pore size, pore volume, and size distribution) determine critical properties such as gas and water permeability, frost resistance, corrosion resistance, and more. Therefore, understanding the impact of chemical admixtures on the cement paste microstructure is fundamental for modern concrete engineering. This is not merely "important"; it forms the basis for innovation and solving complex challenges in construction. For these reasons, research into the influence of chemical admixtures on concrete properties and the nature of its structure formation remains highly prevalent in contemporary concrete science.

Aim and Objectives. The aim of this work is to regulate the structure formation processes of cement paste in concrete, based on thermodynamic analysis data of pore liquid phase transitions within confined pore volumes.

The objectives of this research are:

- To substantiate the application of differential scanning microcalorimetry for analyzing microporosity and phase transformations in hardening cementitious systems.
- To quantitatively assess the parameters of microporosity and their changes over time during the hardening of cementitious systems.

Materials and Methodology. This study investigated the influence of chemical admixtures on the pore formation characteristics of two types of cement: Portland cement PC CEM I 42.5R and slag Portland cement SPC CEM II B-S 32.5R. These cements differ in their mineral composition, slag content, and consequently, in their hydration rate and structure formation characteristics (Table 1).

The impact of several types of chemical admixtures was examined, including hardening accelerators with sodium and potassium cations, and plasticizers (Table 2). All admixtures conformed to the requirements of DSTU B V.2.7-65-97.

Quantitative assessment of pore structure parameters (pore size, pore volume, pore size distribution, pore shape) is performed based on scanning calorimetry data [12]. This assessment employs the principles of equilibrium thermodynamics and considers phenomena at phase boundaries. This approach addresses a complex set of tasks, including determining the parameters of liquid phase transitions during the freezing of porous dispersed materials, evaluating the energetic state of the liquid phase, assessing the degree of transformation during solid-liquid interactions, and evaluating the influence of technological factors and the effectiveness of concrete property

modification with chemical admixtures.

Differential Scanning Calorimetry (DSC) belongs to the group of physicochemical thermal analysis methods used to determine energetic (enthalpy) changes in the substance under investigation. These methods are based on measuring temperature (Differential Thermal Analysis – DTA), spontaneous (Calvet calorimetry), or compensatory (DSC) heat flows [13].

Table 1 – Characteristics of Cements

| Indicators | | CEM I 42.5R | CEM III/B-S 32.5R |
|---|-------------------|----------------|-------------------|
| Actual Activity, MPa | | 52.0 (28 days) | 23.7 (7 days) |
| Activity after Steaming, MPa | | 32.0 | 25.2 |
| Fineness of Cement Grinding (passed through 008 sieve), % | | 91.0 | 91.0 |
| Setting Time, hours-min: Start-End | | 3-20 4-20 | 1-50 7-00 |
| For tests with river sand: Normal Consistency | | 28.0 | 28.1 |
| Mineral Composition, % | C ₃ S | 57.48 | 50.0 |
| | C ₂ S | 21.36 | 30.0 |
| | C ₃ A | 7.57 | 3.8 |
| | C ₄ AF | 12.35 | 16.2 |

Table 2 – Chemical Admixtures

| Name | Chemical Formula | Regulatory Document |
|--------------------------------|--|------------------------------------|
| Potash (Potassium Carbonate) | K ₂ CO ₃ | DSTU B V.2.7-65-97 |
| Sodium Carbonate | Na ₂ CO ₃ | DSTU B V.2.7-65-97 |
| Sodium Chloride | NaCl | DSTU B V.2.7-65-97, TY 6-13-14-77 |
| Potassium Chloride | KCl | DSTU B V.2.7-65-97, TY 6-13-14-77 |
| Potassium Sulfate | K ₂ SO ₄ | DSTU B V.2.7-65-97, TY 38-10742-84 |
| Sodium Sulfate | Na ₂ SO ₄ | DSTU B V.2.7-65-97, TY 38-10742-84 |
| Technical Lignosulfonate (LST) | {C ₁₆ H ₁₅ O ₈ SNa} | TU 13-0281036-05 |
| C-3 | {C ₁₁ H ₇ O ₃ SNa} _n | TU 6-36-020429-625 |

The DSC method is based on heating (or cooling) a sample and a reference at a set rate while maintaining their identical temperatures. It measures the compensatory heat flow required to keep the sample's temperature within the programmed range. Experimental curves represent the dependency of heat flow (mJ/s) or specific heat capacity C_p (J/(g·K)) on temperature. The compensatory heat flow is directly proportional to the change in the sample's internal energy (enthalpy).

The thermoporosimetry method [14] is based on the thermodynamic dependence of the pore water crystallization temperature (T, K) on the pore radius (R_n):

$$R_n = 0.58 + 0.005(T_0 - T) - \frac{63.46}{T_0 - T},$$

where T₀=273.15 K. This allows for the determination of pore sizes in which a first-order phase transition (crystallization of pore liquid) is observed. The peak area, in turn, allows for the determination of the volume of liquid that underwent the phase transition.

Results. The pore formation process in cement paste is significantly more complex than in monomineral binders due to the presence of two developing and interacting structures: hydrosulfoaluminate and hydrosilicate. Hydrosilicates and calcium hydroxide play the primary structure-forming role, constituting the bulk of the cement paste's new formations. Despite the vast morphological diversity of other hydrated new formations in hardened cement paste, their influence on certain physical and mechanical properties is deterministic and can be predicted in advance. The main properties of cement paste – strength, permeability, frost resistance, etc. – are determined by the

ensemble of micropores with a corresponding size distribution. Changes in pore sizes within the 2 to 100 nm range can drastically alter the properties of the cement paste, thus enabling control over the nature of structure formation during the hardening stage. One of the levers for managing cement paste structure formation is the application of chemical and mineral admixtures.

Hardening of the investigated cements within 1 day is accompanied by the formation of a pore structure with two micropore size distribution regions, characteristic of gel and capillary micropores. For Portland cement, these are in the range of 2.2-22 nm, with distribution maxima at 2.36, 2.45, and 14.6 nm. For slag Portland cement, the micropore distribution range narrows to 3.1-6.6 nm, with maxima at 3.4, 3.7, and 6.3 nm (Fig. 1, a). Simultaneously, the volume of micropores increases by 1.3 times compared to Portland cement (Fig. 1, b), reaching 0.46 cm³/g. This is attributed to the slower binding of mixing water during slag Portland cement hydration, the formation of hydrogelenite and hydrogarnets, as well as calcium hydrosilicates of lower basicity than those formed during Portland cement hardening. The consequence is a reduction in capillary micropore sizes and the formation of low-density (LD) C-S-H with porosity in the 3.1-4.2 nm range (Fig. 1, a).

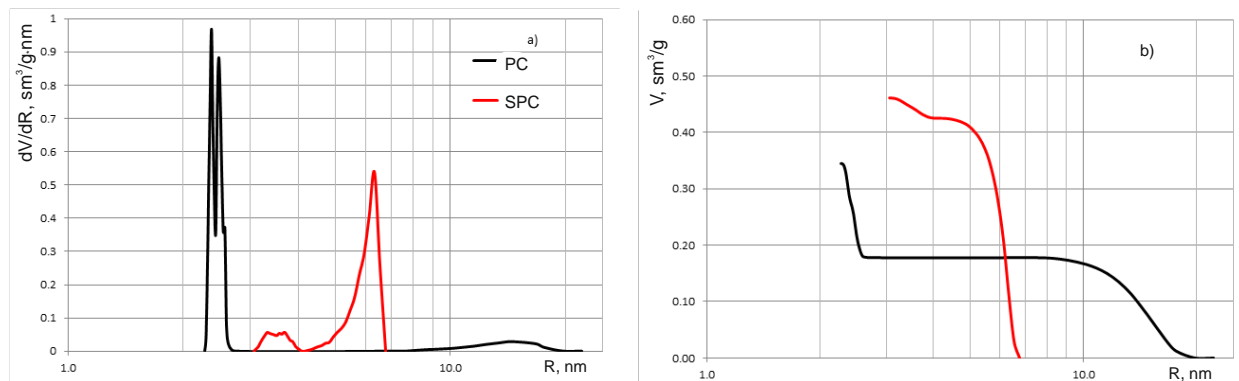


Fig. 1. Influence of cement type on the microporosity of cement stone:
a – pore size distribution; b – total pore volume

Gel microporosity in slag Portland cement (SPC) accounts for only 7.6% of the total porosity, whereas the analogous figure for Portland cement (PC) is 47%. Consequently, the amount of calcium hydrosilicates formed in the cement paste is 40% higher in PC than in SPC for the same hardening time.

In complex admixtures, each component complements the others and differs in its influence on the formation of the cement stone structure. For instance, the action of hardening accelerators is linked to increasing the solubility of the main cement minerals by altering the ionic strength of the solution and accelerating the crystallization of new phases. Sodium salt cations promote an increase in the alkalinity of the medium and exert a catalytic effect on the hydration of calcium silicates. The adsorption mechanism of Lignosulfonate (LST) and C-3 determines the reduction of surface tension at the phase interface, the release of immobilized water, etc., ultimately leading to the plasticization of mixtures. The effect of complex admixtures is more intricate due to the superposition of different component action mechanisms.

To enhance the efficiency of cement stone modification, further research is needed to identify the quantitative relationship between the composition of complex admixtures and concrete properties. The multi-component nature of admixtures and the associated complication of structure formation processes objectively lead to increased complexity of admixtures as objects of analysis and optimization. The influence of such chemical admixtures on the formation of cement stone microporosity was examined using sulfates, carbonates, chlorides of sodium and potassium as hardening accelerators, and plasticizing admixtures LST and C-3. Establishing patterns for the directed regulation of cementitious system parameters at the micro-level is a fundamental prerequisite for obtaining concretes with specified technical properties.

During the hardening of Portland cement over 1 day in the presence of C-3 (Fig. 2), two micropore size distribution regions are formed within the 4.6-9 nm interval. The ratio of gel and capillary micropores in the cement stone at this age is 12% and 88%, respectively, of the total volume.

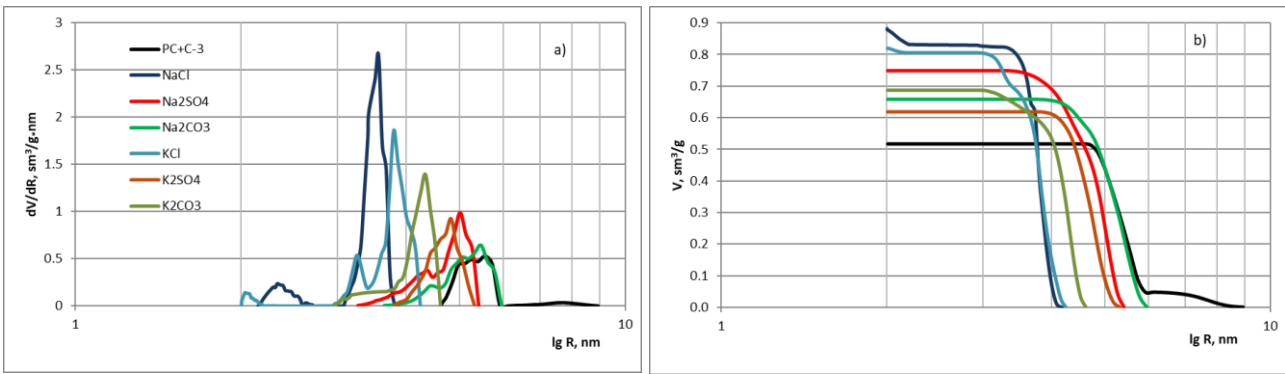


Fig. 2. Influence of complex admixtures based on C-3 on microporosity (Portland cement, 1 day): a – pore size distribution; b – total pore volume

During the hardening of Portland cement with complex admixtures based on Lignosulfonate (LST), a characteristic reduction in the total volume of micropores is observed when accelerators are introduced (Fig. 3). In this case, the percentage content of capillary micropores ranges from 70% (sodium and potassium sulfates, sodium chloride) to 85% (potassium carbonate). In combination with potash, LST is the most effective retarder at early hardening stages.

The ratio of gel to capillary micropores in the control sample is 69% and 31%, respectively. In the sample with KCl, the capillary micropore content is only 5%, and in the presence of sodium carbonate, they are entirely absent.

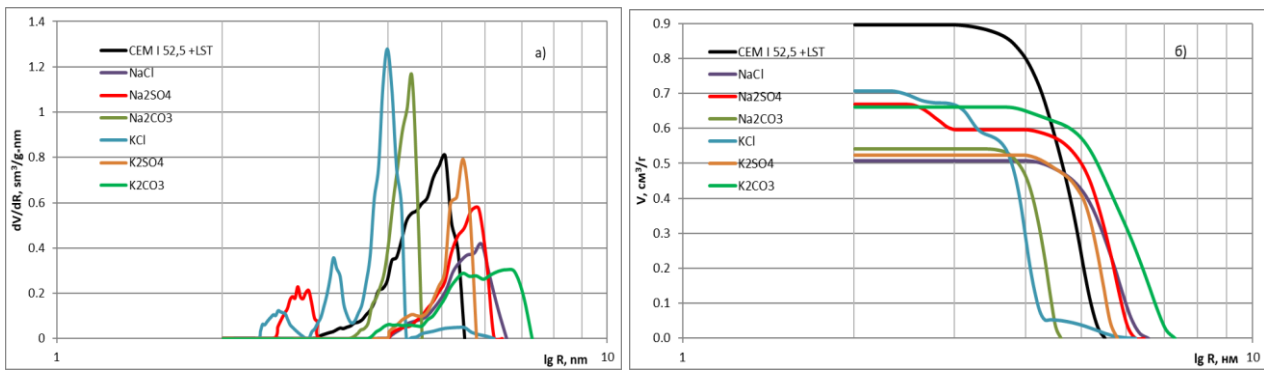


Fig. 3. Influence of complex admixtures based on LST on microporosity (Portland cement, 1 day): a – pore size distribution; b – total pore volume

During the hardening of slag Portland cement with complex admixtures based on C-3, the role of the anionic component of accelerators is clearly visible (Fig. 4). Potassium salt admixtures exhibit the best synergistic effect, contributing to the formation of microporosity with a minimal volume. In this case, the micropores of all samples are distributed within a narrow range of 3 to 5.2 nm.

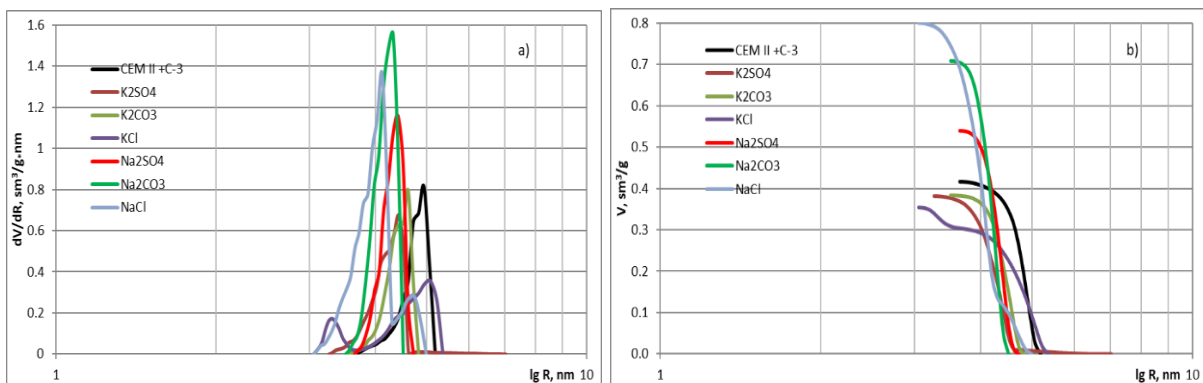


Fig. 4. Influence of complex admixtures based on C-3 on microporosity (Slag Portland Cement, 1 day): a – pore size distribution; b – total pore volume

For slag Portland cement with complex admixtures based on Lignosulfonate (LST), no clear patterns of structure formation are observed (Fig. 5).

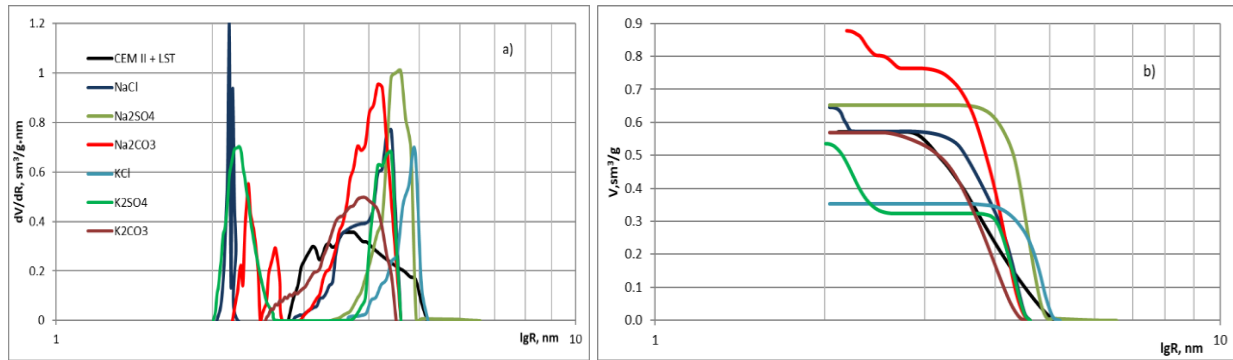


Fig. 4. Influence of complex admixtures based on LST on microporosity (Slag Portland Cement, 1 day): a – pore size distribution; b – total pore volume

The distribution range expands from 2 to 55 nm. Admixtures of NaCl, K₂SO₄, and Na₂CO₃ contribute to the formation of high-density calcium hydrosilicates with characteristic gel micropore sizes.

The ratio of gel to capillary pores allowed for the determination of the efficiency coefficient K_{eff} as the ratio of dynamic microstructural indices:

$$K_{eff} = -\lg\left(\frac{|V_{cap1}-V_{gel1}|}{V_{total1}} \cdot \frac{V_{total0}}{|V_{cap0}-V_{gel0}|}\right), \quad (1)$$

where V_{gel} is the volume of gel pores; V_{cap} is the volume of capillary pores, V_{total} is the total pore volume, index 1 corresponds to cement with admixtures, and 0 – without admixture.

The effectiveness of complex admixtures is determined by the combination of plasticizer and accelerator. As our studies have shown, for complex admixtures based on LST, potassium chloride is most effective for Portland cement, and sodium chloride for slag Portland cement (Fig. 6).

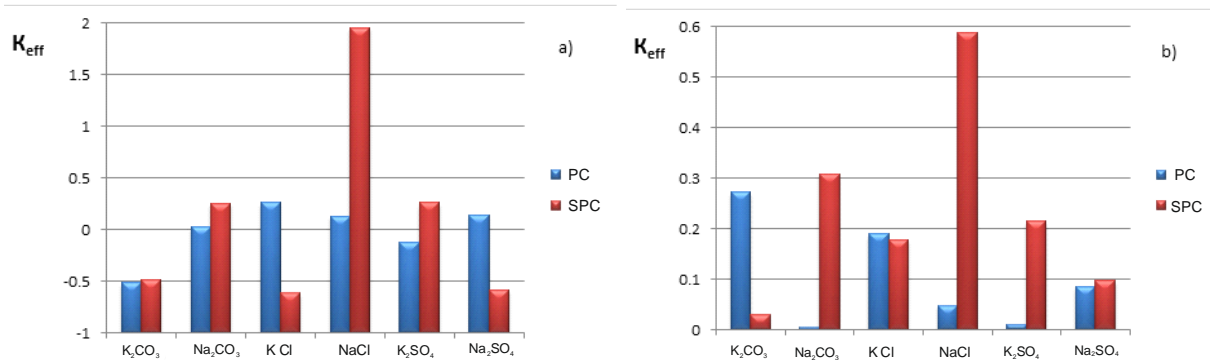


Fig. 6. Effectiveness of complex admixtures based on: a – LST; b – C-3

For complex admixtures based on C-3, sodium chloride is also the most effective for slag Portland cement in terms of cement paste structure formation. For Portland cement, the combination of C-3 with potassium carbonate represents the most effective complex admixture option.

Chlorides are effective accelerators of cement hydration. They increase the ion concentration in the pore solution, promoting the rapid dissolution of C₃S and C₃A, which leads to faster formation of C-S-H gel and ettringite. Research [15] indicates that accelerators can initially form a more "open" or irregular structure due to rapid hydrate formation. However, the simultaneous use of a plasticizer (which reduces the water-to-cement ratio and improves dispersion) can compensate for this effect, leading to the formation of a more refined and denser porosity, which correlates with our obtained data.

Conclusions. The conducted research represents an important step in understanding the influence of complex chemical admixtures on the microstructure of cement paste. Specifically, the

conclusion regarding the achievement of minimal pore radius and an optimal ratio of gel to capillary pores through the combination of plasticizer and accelerator, as well as the proposal of the K_{eff} coefficient as a microstructural index, open broad prospects for further research.

It is worth further investigating the specific mechanisms of their interaction with various cement minerals (alite, belite, C_3A , C_4AF) in the presence of plasticizers. A more detailed study is needed on precisely how these complex admixtures influence the formation, density, and internal structure of C- S-H gel – the main component determining concrete strength.

References

- [1] S. Mahmoud, "Sayed Ahmed Statistical Modelling and Prediction of Compressive Strength of Concrete", *Concrete Research Letter*, 2012. vol. 3(2), pp. 452-458. <https://www.researchgate.net/publication/233415183>
- [2] *Computational Modelling of Concrete and Concrete Structures*. Meschke, Pichler & Rots (Eds), EURO-C 2022 conference. Vienna, Austria, 2022. 767 p. <https://library.oapen.org/bitstream/id/5ee90490-2d47-45fa-918f-3ff6dedacbd2/9781000644715.pdf>
- [3] A.A. Hilal, "Microstructure of Concrete", *High Performance Concrete Technology and Application*. InTech, Oct. 05, 2016. <http://dx.doi.org/10.5772/64574>.
- [4] H.M. Jennings, "A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste", *Cement and Concrete Research.*, 30(1), pp.101-116, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00209-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00209-4).
- [5] K.K. Aligizaki, *Pore Structure of Cement-Based Materials. Testing, interpretation and requirements*. New York: Taylor & Francis, 2006. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781482271959_A38165198/preview-9781482271959_A38165198.pdf
- [6] Jianzhuang Xiao, Zhenyuan Lv, Zhenhua Duan, Ch. Zhang, "Pore structure characteristics modulation and its effect on concrete properties. A review", *Construction and Building Materials*, 397(10), 132430, 2023. <https://www.researchgate.net/publication/373588522>.
- [7] J. Plank, E. Sakai, C.W. Miao, C. Yu, J.X. Hong, "Chemical admixtures – Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability", *Cement and Concrete Research*, vol. 78, Part A, pp. 81-99, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.016>.
- [8] Z. Tuskaeva, S. Karyayev, "Influence of various additives on properties of concrete", *TPACEE-2019, E3S Web of Conferences*, 164, 14007, 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016414007>.
- [9] W. Kujawa, I. Tarach, E. Olewnik-Kruszkowska, A. Rudawska, "Effect of Polymer Additives on the Microstructure and Mechanical Properties of Self-Leveling Rubberised Concrete", *Materials*, 15(1), 249, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15010249>.
- [10] N. Asatov, "Concrete structure with complex additives", *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 1030, 012014, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012014>.
- [11] V. Sopov, L. Pershina, L. Butskaya, E. Latores, O. Makarenko, "The role of chemical admixtures in the formation of the structure of cement stone", *Transbud-2017. MATEC Web of Conferences*, 116, 01018, 2017. <https://doi.org/10.1051/MATECCONF/201711601018>.
- [12] P. Sobhanipour, R. Cheraghib, A. A. Volinsky, "Thermoporometry study of coagulation bath temperature effect on polyacrylonitrile fibers morphology", *Thermochimica Acta*, no. 518, pp.101–106, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.02.015>.
- [13] A.V. Usherov-Marshak, V.P. Sopov, "Thermoporometry of cement stone", *Colloidal journal*, vol. 56, no. 4, pp. 600-603, 1994. https://www.researchgate.net/publication/293212305_Thermoporometry_of_cement_stone
- [14] W. Hemminger, G. Höhne, H.-J. Flammersheim, *Differential Scanning Calorimetry*. Second Edition. Springer, 2003.

[15] A.F. Simedru, O. Cadar, A. Becze, D. Simedru, "Restructuring the Basic Design of Several Accelerator-Based Concrete Mixes by Integrating Superplasticizers", *Materials*, 17, 5582, 2024. <https://doi.org/10.3390/ma17225582>.

ФОРМУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ В ПРИСУТНОСТІ КОМПЛЕКСНИХ ХІМІЧНИХ ДОБАВОК

¹Сопов В.П., д.т.н., професор,
vsopov@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1908-0421

¹Андрух С.Л., к.т.н., доцент,
sl_a@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5041-885X
¹Сумський національний аграрний університет
вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40000, Україна

Анотація. У статті експериментально досліджуються можливості технологічного регулювання параметрів мікроструктури цементного каменю та бетону шляхом введення хімічних добавок різної природи. На основі досліджень впливу хімічних добавок на процеси гідратації цементу та мікроструктуру цементного каменю було проведено порівняльну оцінку твердіння та пороутворення цементного каменю з прискорювальними, пластифікуючими та комплексними добавками.

Зокрема, дослідження зосереджено на впливі комплексних хімічних добавок, які включають суперпластифікатор С-3 (на основі нафталінсульфонату) та LST (лігносульфонат), у поєднанні з прискорювачами, такими як NaCl або KCl, Na₂CO₃, K₂CO₃, Na₂SO₄, K₂SO₄ на характеристики пороутворення під час твердіння двох типів цементу: портландцементу PC CEM I 42.5R та шлакопортландцементу SPC CEM II B-S 32.5 R. Ці цементи відрізняються своїм мінеральним складом, вмістом шлаку, а отже, швидкістю гідратації та структуроутворенням.

Було встановлено, що цементний камінь, пористість якого характеризується мінімальним радіусом пор та оптимальним співвідношенням між об'ємами гелевих та капілярних пор, може бути досягнутий шляхом комплексного застосування прискорювача та пластифікатора. Синергетичний ефект суперпластифікатора, що зменшує водоцементне співвідношення та покращує дисперсність частинок, а також прискорювач, що прискорює ранню гідратацію, сприяють утворенню покращеної структури пор.

Крім того, запропоновано новий підхід до оцінки ефективності модифікації структури цементного каменю з використанням коефіцієнта K_{ef} , який визначається як співвідношення між об'ємами гелевих та капілярних пор (співвідношення динамічних мікроструктурних індексів). Ця кількісна інформація щодо мікроструктури цементного каменю та меж її регулювання під впливом внутрішніх та зовнішніх факторів дозволила сформулювати концепцію щодо можливостей досягнення заданих властивостей бетону шляхом модифікації відповідних параметрів мікропористості цементного каменю.

Ключові слова: цементний камінь, мікроструктура, мікропористість, хімічні добавки, структуроутворення, радіус пор, розподіл пор за розмірами.

Стаття надійшла до редакції 21.05.2025

Стаття прийнята до друку 14.07.2025

Дата публікації статті 24.09.2025

[This work by](#) © 2025 by [Sopov V.P., Andruk S.L.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

**AIR DISTRIBUTION EFFICIENCY WITH A LINEAR SLOT DIFFUSER
IN NON-ISOTHERMAL CONDITIONS**

¹**Chemerynskyi Yaroslav**, postgraduate,
yaroslav.r.chemerynskyi@lpnu.ua, ORCID: 0009-0001-8939-4135

¹**Voznyak Orest**, ScD, Professor,
orest.t.vozniak@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-6431-088X

¹*Lviv Polytechnic National University*
12 Stepana Bandery St., Lviv, 79013, Ukraine

Abstract. Effective provision of a comfortable indoor climate is a key requirement for modern central air ventilation systems. These systems play an important role in creating a healthy and comfortable environment for living, working or relaxing. Taking into account modern architectural trends and design solutions, linear louver diffusers are becoming increasingly popular as air distribution devices. Their aesthetic appeal allows them to be harmoniously integrated into interior design, often making them central elements that emphasize the style of the room.

The design feature of linear louver diffusers lies in their specific structure: they have a small width with a significant length, which distinguishes them from traditional compact diffusers of round or square shape. This feature significantly affects the characteristics of the air jet formed by such diffusers. During the operation of ventilation systems in air conditioning or air heating modes, linear diffusers create unique air flows that differ from compact jets in their behavior, velocity and temperature distribution. These differences must be taken into account at the stages of design, adjustment and operation of ventilation systems in order to ensure their effective operation and achieve an optimal microclimate.

Data obtained from computer modeling and experimental studies play a key role in the development and optimization of ventilation systems with linear louver diffusers. Modeling allows you to predict the behavior of air flows in different conditions, taking into account the geometry of the room, the location of the diffusers and air parameters (temperature, humidity, flow rate). Experimental studies, in turn, confirm theoretical calculations and allow you to refine the parameters of the system. Thanks to an integrated approach that combines modeling and experiments, it is possible to achieve high efficiency of ventilation systems, minimize energy consumption and ensure a comfortable microclimate in the premises.

The use of linear louver diffusers also contributes to reducing noise exposure and uniform air distribution, which is especially important for residential and public spaces. Proper selection and adjustment of such diffusers allows you to avoid areas of air stagnation or excessive turbulence, which can negatively affect the comfort of users. Thus, taking into account the features of linear diffusers at all stages – from design to operation – is the key to creating effective and aesthetically attractive ventilation systems that meet modern requirements for comfort and energy efficiency.

Keywords: microclimate, thermal comfort, flat jet, air distribution; air flow turbulence.

Introduction. The requirements of current standards for the microclimate in rooms where people are located are strict and require ensuring a high level of ventilation and air distribution quality, the necessary temperature distribution and a comfortable microclimate [1, 2].

To ensure comfortable conditions in the room, air distribution devices operate in a non-isothermal mode for a significant part of the time, i.e. the temperature of the air supplied from the diffusers is different from the air temperature in the room [3, 4]. It is important in public and residential premises with constant operation of ventilation systems to correctly calculate and adjust the air distribution in such a way as to reduce the possibility of drafts in the rooms [5], to avoid the

formation of stagnant zones and large differences in air temperature in the room [6].

One of the most effective and optimal solutions for small-sized rooms is the use of linear louver diffusers [7][9]. Such diffusers ensure uniform distribution of heated or cooled supply air, supply of a large amount of air [8, 9] with rapid attenuation of the axial velocity of the air in the jet [10, 11]. The use of linear slot diffusers allows for comfort in rooms [12], improve working conditions and efficiency, reduce [13] the cost of operating ventilation systems [14] and energy consumption [15].

Studies of air distribution devices confirm that it is the use of linear slot diffusers that allows for the best quality of air distribution in rooms and microclimate.

Analysis of the recent publications and research works on the problem. Many studies and scientific articles in the past and present concern the operating characteristics of ventilation systems and air distribution devices [16][26], which is very important for ensuring microclimate parameters in premises for various purposes [6], 17, 18]. Studies are carried out using numerical simulations and experimentally [19-21]. However, today a significant number of these studies concern vortex diffusers [3, 22]. The operating parameters of linear slot diffusers are insufficiently studied, but important because such diffusers are quite popular today [23, 24]. The studies described the characteristics of air flows under isothermal conditions.

Due to the lack of generalized calculation methods for linear louver slot diffusers available on the market, despite their similarity in appearance, they often have quite significant differences in technical characteristics [5].

Known studies conducted using mathematical modeling consider flat and vortex air jets, but do not describe rectangular ones, which are characterized by a small slot width and a relatively large length. These studies were conducted based on the analysis of several modeling approaches, in particular the $k-\varepsilon$ model, since they allow for fairly high-quality numerical modeling [6].

Therefore, the study of the parameters and characteristics of linear slot diffusers and the formation of methods and determination of dependencies for their calculations, especially when operating in non-isothermal conditions, which are an approximation to the actual operating conditions, is important for energy-efficient and high-quality provision of the required microclimate parameters in rooms and safe operation of such equipment [12, 25].

For linear slot diffusers, calculation and modeling of the temperature distribution and attenuation in the jet is necessary, since these diffusers are used mainly in rooms of small volume and at short distances from the area where people are staying [26].

The purpose of the article is to analyze the effectiveness of using linear slot diffusers in ventilation systems operating in non-isothermal conditions and to investigate their aerodynamic characteristics.

Research methodology. Using the methods of physical and mathematical modeling of air flow motion based on jet flow equations, theoretical research methods were applied, thanks to which calculated dependencies were obtained for determining the parameters of the air flow and geometric parameters of the linear louver diffuser.

Using assumptions and simplifications, the results of experimental studies were also processed. Based on the theory of similarity and modeling of scales for the conversion of physical quantities and for visualization of the air flow structure and the structure of microjets, the results of these experimental measurements were processed. A planning matrix was constructed for planning a multifactorial experiment.

Presentation of research results. In ventilation systems of premises air distribution devices of various designs are used. These devices, depending on their structure and purpose, have common as well as significantly different operating characteristics.

Flat jets formed during the operation of louvered slotted linear diffusers are [3]:

- free, if such jets have no obstacles in their development;
- not free, if the development of the jet is affected by obstacles and surfaces of the premises;
- isothermal, the air temperature in the jet and in the room is the same;
- non-isothermal (heated or cooled), when the air temperature in the jet is different from the air temperature in the room.

Slotted linear diffusers have several flat slots and during their operation, the effect of interaction of several parallel flat jets occurs at the outlet of the device, which leads to turbulization of the entire air flow and a drop in temperature in the jet.

In non-isothermal flat jets, when heated air is supplied horizontally, there is a deviation of the jet upwards, when cooled air is supplied, there is a deviation downwards due to the influence of gravitational forces [24].

As a result of such a deviation of each flat microjet formed by each slot of the linear slot diffuser, rapid mixing of the flows occurs, as shown in Fig.1. This leads to a sharper decrease in the speed of the total jet formed by a diffuser of this type.

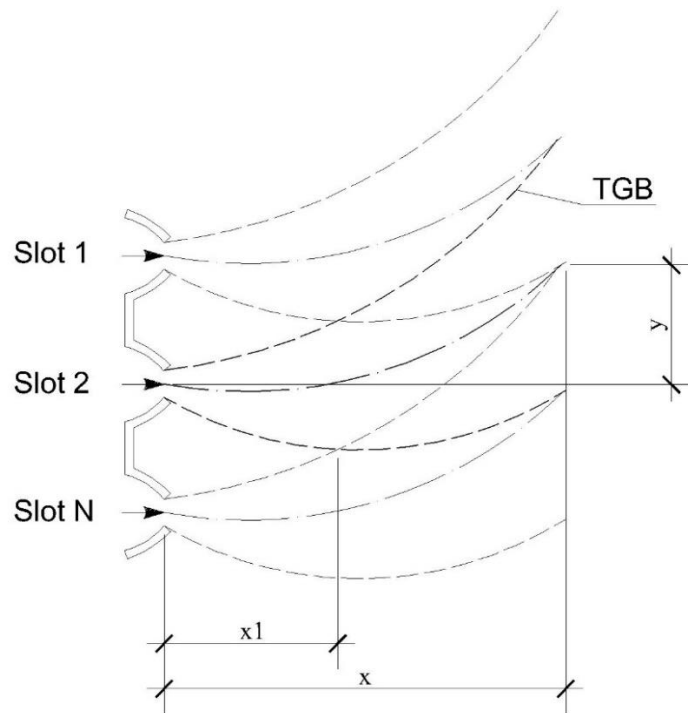


Fig. 1. Thermal limits of microjets of a linear louvered slot diffuser:

TGB – thermal jet boundary; x – current longitudinal coordinate; x_1 – coordinate of the start of mixing of microjets; y – the amount of deviation from the jet axis to the slit axis; Slot 1...Slot N – linear diffuser slots

The relationship between gravitational and inertial forces in non-isothermal jets and microjets at the moment of air leakage is characterized by the Archimedes criterion Ar_o :

$$Ar_o = \frac{g\sqrt{F_o}\Delta t_o}{V_o^2 \cdot T_{in}}, \quad (1)$$

where $g = 9.81 \text{ m/s}^2$;

F_o – nozzle area, m^2 ;

Δt_o – excessive initial temperature, $\Delta t_o = t_o - t_{in}$, K;

T_{in} – absolute indoor air temperature, K, t_{in} – indoor air temperature, $^{\circ}\text{C}$;

V_o – initial speed, m/s.

In non-isothermal jets discharged horizontally, the excess temperature $\Delta t_x = t_x - t_{in}$ is determined by the formula:

$$\Delta t_x = \frac{N}{x}, \quad (2)$$

where x – current longitudinal coordinate;

N – thermal parameter:

$$N = \frac{0.54}{tg\alpha} \sqrt{\frac{T_B}{T_o}} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\xi}} \cdot \Delta t_o \cdot \sqrt{F_o}, \quad (3)$$

where α – is the jet opening angle, $\alpha = 12^\circ 25'$, and $\operatorname{tg}\alpha = 0.22$;

ξ – local resistance coefficient, $\xi = 1$;

T_0 – absolute temperature at the nozzle outlet, K.

In calculations, to simplify them, the temperature damping coefficient during jet development is used n :

$$n = \frac{0.54}{\operatorname{tg}\alpha} \sqrt{\frac{T_B}{T_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\xi}}, \quad (4)$$

then the axial excess temperature Δt_x :

$$\Delta t_x = n \cdot \Delta t_0 \cdot \frac{\sqrt{F_0}}{x}. \quad (5)$$

Therefore, excess temperature $\Delta t_x = t_y - t_{in}$ in any cross section "x" at a distance "y" from the axis is determined by the formula:

$$\Delta t_y = \Delta t_x \cdot \exp(-0.7\sigma_T \bar{y}^2), \quad (6)$$

where σ_T – turbulent Prandtl number, $\sigma_T = 0.65 - 0.70$;

\bar{y} – current transverse coordinate, $\bar{y} = y/cx$ – experimental constant, $c = 0.28$.

The calculations use the relative values of excess temperatures, axial $\Delta \bar{t}_x = \Delta t_x / \Delta t_0$ and in any cross-section $\Delta \bar{t}_y = \Delta t_y / \Delta t_x$.

Practical calculations of jets are performed using the formulas [24]:

$$\Delta \bar{t}_x = n \cdot \sqrt{\frac{F_0}{x}} \cdot \frac{1}{k_n}, \quad (7)$$

where, k_n – the coefficient of non-isothermality, for plane jets, is 1.13 (for heated) and 0.82 (for chilled).

The research was conducted on the following experimental setup, which is schematically shown in Fig. 2.

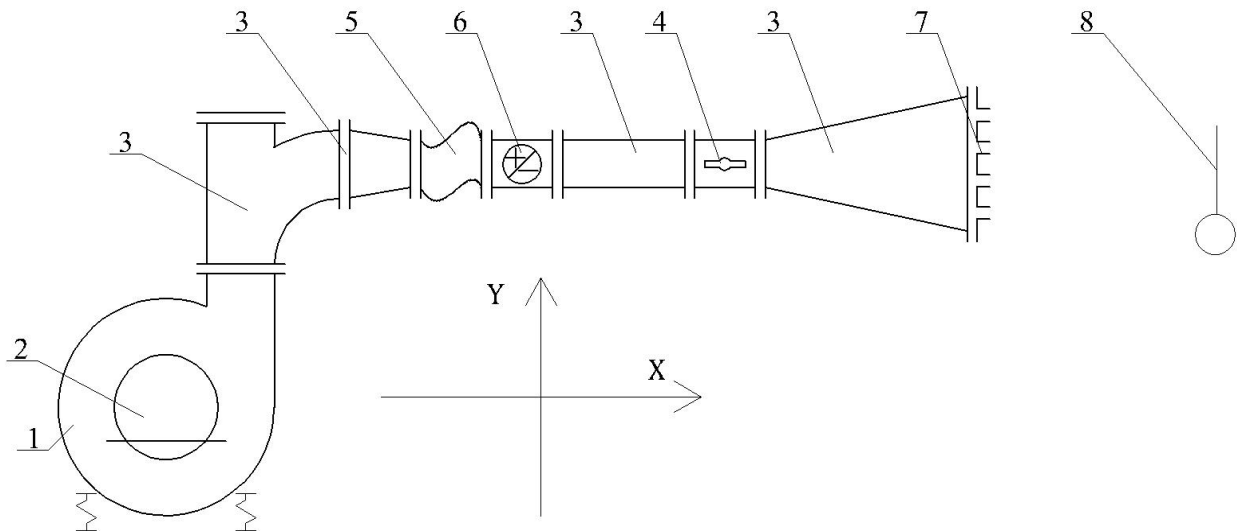


Fig. 2. Experimental setup (schematically):

- 1 – fan; 2 – electric motor; 3 – air duct; 4 – control valve; 5 – flexible insert; 6 – air heater/cooler; 7 – linear slot diffuser; 8 – testo-405i thermoelectroanemometer

The experimental setup consists of a fan, a regulating throttle to set the required flow rate, an air cooler and air heater, an air duct system that provides air supply and a linear louver diffuser, as well as instruments for measuring air velocity and temperature.

The studies were conducted for different numbers of slots of the linear louver diffuser and different slot lengths. The height of all slots was constant. The research process is shown in Fig. 3.



Fig. 3. Field studies:

a – linear diffuser louvers; b – general view of the experimental setup; c – measurement of isothermal jet parameters; d – visualization of the jet with smoke

After processing the experimental data, the following dependence of the drop in the relative jet temperature was obtained depending on the relative current coordinate Fig. 4.

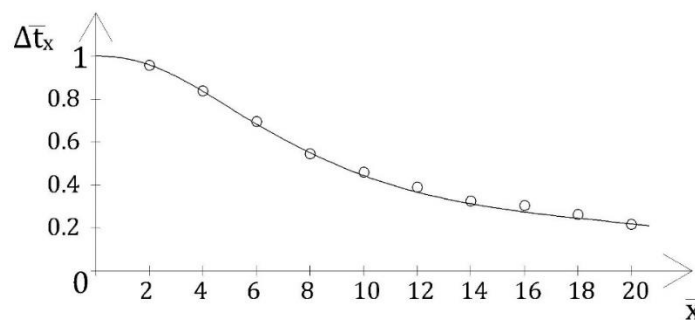


Fig. 4. Dependence of relative temperature on longitudinal coordinate $\Delta \bar{t}_x = f(\bar{x})$ for linear slot diffuser (° – experimental data)

According to the obtained results, which are shown in Fig. 3, it can be concluded that the heated or cooled air flow leaving the louvered linear diffuser is turbulized faster than the air distribution grilles. As a result, the velocity and temperature decay in the jet occurs faster and more actively. The value of the temperature decay coefficient for the linear louvered slot diffuser is equal to $n = 1.5 - 2.0$, which is significantly smaller compared to such a coefficient for a conventional air distribution grille, for which $n = 3.2$.

Conclusion. The obtained dependences of the velocity decay as a result of the conducted studies of non-isothermal flat jets formed in linear louvered slot diffusers allow to improve and expand the existing methods of calculating air distribution devices.

It has been confirmed that with the joint interaction of several flat jets formed in linear louvered slot diffusers, a 10 - 20 % sharper decrease in the air temperature in the jet is observed due to greater turbulence of the air flow.

The temperature attenuation coefficient for the linear slot diffuser $n = 1.5 - 2.0$ allows it to be used in ventilation systems with high air distribution conditions, without the occurrence of drafts in the premises.

References

- [1] ASHRAE/ANSI Standard 55-2010 Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, USA, 2010.
- [2] A. Li, C. Yang, T. Ren, X. Bao, E. Qin, R. Gao, 2017, "PIV experiment and evaluation of air flow performance of swirl diffuser mounted on the floor", *Energy and Buildings*, vol. 156, pp. 58–69, 2017. doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.045.
- [3] M. Borowski, K. Zwolińska, J. Halibart, "Air distribution assessment-ventilation systems with different types of linear diffusers". [Online]. Available: https://www.aivc.org/sites/default/files/1_C28.pdf. 2023.
- [4] O.T. Vozniak, I.Ye. Sukholova, Kh.V. Myroniuk, "Doslidzhennia prystroiu dlia povitrorozpodilu zakruchenymy i nastylnymy strumynamy u zminnomu rezhymi", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 7(78), pp. 15, 2015, doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56235.
- [5] M. Borowski, M. Karch, R. Łuczak, P. Życzkowski, M. Jaszczur, "Numerical and experimental analysis of the velocity field of air flowing through swirl diffusers", *E3S Web Conference*, vol. 128, pp.1-6, 2019. doi.org/10.1051/e3sconf/201912805003.
- [6] Y.H. Yau, K.S. Poh, A. Badarudin, "A numerical airflow pattern study of a floor swirl diffuser for UFAD system", *Energy and Buildings*, vol. 158, pp. 525-535, 2018. doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.037.
- [7] G. Cao, M. Ruponen, K. Hagström, J. Kurnitski, "Experimental studies on air distribution using ceiling slot diffusers in a room", *International Journal of Ventilation*, vol 9 (4), pp. 385-392, 2016. doi.org/10.1080/14733315.2011.11683896.
- [8] O. Voznyak, N. Spodyniuk, Yu. Yurkevych, I. Sukholova, O. Dovbush, "Enhancing efficiency of air distribution by swirled-compact air jets in the mine using the heat utilizers", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 5 (179), pp. 89 – 94, 2020. doi:10.33271/nvngu/2020-5/089. doi.org/10.33271/nvngu/20205/089.
- [9] B. Both, Z. Szánthó, R. Goda, "Evaluation of air diffuser flow modelling methods experiments and computational fluid dynamics simulations", *Energy Procedia*, vol. 112, pp. 352-359, 2017. doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.06.021.
- [10] H. Yu, C-M. Liao, H-M. Liang, "Scale model study of airflow performance in a ceiling slot-ventilated enclosure: isothermal condition", *Building and Environment*, vol. 38, pp. 1271-1279, 2003. dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00131-8.
- [11] M.M. Keshtkar, M. Nafteh, "Investigation of influence of linear diffuser in the ventilation of operating rooms", *Advances in Energy Research*, vol. 4, pp. 239-253, 2016. dx.doi.org/10.12989/eri.2016.4.3.239.
- [12] D. Law, A. Valdez, "Computational modeling and simulations of isothermal plane (linear) air jet velocity profile for slot diffusers", *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)* 7, 2014. doi.org/10.1115/IMECE2014-37317.
- [13] M. Borowski, R. Łuczak, J. Halibart, K. Zwolińska-Gładys, M. Karch, "Airflow fluctuation from linear diffusers in an office building: the thermal comfort analysis", *Energies*, vol. 14, pp. 4808, 2021. doi.org/10.3390/en14164808.

- [14] S. Sheng, T. Yamanaka, T. Kobayashi, "Heating and ventilation performance investigation of a novel linear slot diffuser with adaptive outlet area for near window applications", *Building and Environment*, vol. 244, 2023, doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110813.
- [15] D.Y. Park, S. Chang, "Numerical analysis on the thermal and air exchange performance of linear slot diffuser length variations in an office space", *Indoor Air 2014 - 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, pp. 334–341, 2014.
- [16] Y. Chemerynskyi, O. Voznyak, "Some characteristics of air distribution at application of linear crevice diffuser", *Energy Engineering and Control Systems*, vol. 11, pp. 21 – 26, 2025. doi.org/10.23939/jeecs2025.01.021.
- [17] J. Zhang, H. Kwok, J. Cheng, "Heritage Building Air Diffusion Performance Index: HVAC Diffuser Layout Evaluation for Heritage Building Preservation", *Proceedings of the 20th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE)*, vol. 628, Montréal, Québec, Canada, 2024.
- [18] M. Madaliev, M. Usmonov, F. Tillaboyeva, A. Mamatov, B. Otakulov, S. Ro'zaliyev, Z. Mamatova, "Comparison of numerical results of RSM turbulence models for the problem of asymmetrical plane diffuser", *BIO Web of Conferences*, vol. 145, 2024. doi.org/10.1051/bioconf/202414503036.
- [19] T. Eraslan, C. Keskin, M. Mengüç, "Airflow Characteristics and Thermal Comfort of Air Diffusers", *ASME 2023 Heat Transfer Summer Conference*, 2023. doi.org/10.1115/ES2023-107024.
- [20] W.K. Chow, L.T. Wong, "Experimental studies on air diffusion of a linear diffuser and associated thermal comfort indices in an air-conditioned space", *Building and Environment*, vol. 29, pp. 523–530, 1994. doi.org/10.1016/0360-1323(94)90011-6.
- [21] M. Alkhalaf, A. Ilinca, M. Hayyani, F. Martini, "Impact of Diffuser Location on Thermal Comfort Inside a Hospital Isolation Room", *Designs*, vol. 8, 2024. doi.org/10.3390/designs8020019.
- [22] O. Voznyak, V. Bokhan, I. Sukholova, M. Kasynets, H. Klymenko, "Improvement of air distribution in a room with swirled air jets", *Theory and Building Practice*, vol. 7, pp. 112–116, 2025. doi.org/10.23939/jtbp2025.01.112.
- [23] A. Erdogan, I. Aksoy, S. Canbazoglu, "Effects of geometric parameters of perforated diffuser on sound pressure level sourced by airflow", *Black Sea Journal of Engineering and Science*, vol. 7, 2024. doi.org/10.34248/bsengineering.1421571.
- [24] H. Schlichting, *Boundary Layer Theory* (6th Ed.), McGraw-Hill, New York, 1968.
- [25] O. Voznyak, Y. Chemerynskyi, I. Sukholova, M. Kasynets, O. Savchenko, "Improving the efficiency of air distribution in a room with a linear slot diffuser", *Theory and Building Practice*, vol. 7, pp. 106–111, 2025. doi.org/10.23939/jtbp2025.01.106.
- [26] O. Voznyak, I. Sukholova, N. Spodyniuk, M. Kasynets, O. Savchenko, O. Dovbush, O. Datsko, "Enhancing of ventilation efficiency of premise due to linear diffuser", *Pollack Periodica*, vol. 18, pp. 107-112, 2023. doi.org/10.1556/606.2023.00750.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОВІТРОРОЗПОДІЛУ ЛІНІЙНИМ ЩІЛИННИМ ДИФУЗОРОМ В НЕІЗОТЕРМІНИХ УМОВАХ

¹Чемеринський Я.Р., аспірант,
yaroslav.r.chemerynskyi@lpnu.ua, ORCID: 0009-0001-8939-4135

¹Возняк О.Т., д.т.н, професор,
orest.t.vozniak@lpnu.ua, ORCID:0000-0002-6431-088X

¹Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Анотація. Ефективне забезпечення комфортного мікроклімату в приміщеннях є ключовою вимогою до сучасних центральних систем вентиляції повітря. Ці системи

відіграють важливу роль у створенні здорового та комфортного середовища для проживання, роботи чи відпочинку. З урахуванням сучасних архітектурних тенденцій і дизайнерських рішень, лінійні жалюзійні дифузори набувають дедалі більшої популярності як повітророзподільні пристрої. Їхня естетична привабливість дозволяє гармонійно інтегрувати їх у дизайн інтер'єру, часто роблячи їх центральними елементами, що підкреслюють стиль приміщення.

Конструктивна особливість лінійних жалюзійних дифузорів полягає в їхній специфічній будові: вони мають малу ширину при значній довжині, що відрізняє їх від традиційних компактних дифузорів круглої чи квадратної форми. Ця особливість суттєво впливає на характеристики повітряної струмини, яка формується такими дифузорами. Під час роботи вентиляційних систем у режимах кондиціонування або повітряного опалення лінійні дифузори створюють унікальні повітряні потоки, що відрізняються від компактних струмин за своєю поведінкою, розподілом швидкості та температури. Ці відмінності необхідно враховувати на етапах проєктування, налаштування та експлуатації систем вентиляції, щоб забезпечити їхню ефективну роботу та досягти оптимального мікроклімату.

Дані, отримані в результаті комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень, відіграють ключову роль у розробці та оптимізації вентиляційних систем із лінійними жалюзійними дифузорами. Моделювання дозволяє прогнозувати поведінку повітряних потоків у різних умовах, враховуючи геометрію приміщення, розташування дифузорів і параметри повітря (температуру, вологість, швидкість потоку). Експериментальні дослідження, у свою чергу, підтверджують теоретичні розрахунки та дозволяють уточнити параметри роботи системи. Завдяки комплексному підходу, що поєднує моделювання та експерименти, можна досягти високої ефективності вентиляційних систем, мінімізувати енергоспоживання та забезпечити комфортний мікроклімат у приміщеннях.

Використання лінійних жалюзійних дифузорів також сприяє зниженню шумового впливу та рівномірному розподілу повітря, що особливо важливо для житлових і громадських приміщень. Правильний підбір і налаштування таких дифузорів дозволяють уникнути зон застою повітря чи надмірної турбулентності, що може негативно впливати на комфорт користувачів. Таким чином, врахування особливостей лінійних дифузорів на всіх етапах – від проєктування до експлуатації – є запорукою створення ефективних і естетично привабливих вентиляційних систем, які відповідають сучасним вимогам до комфорту та енергоефективності.

Ключові слова: мікроклімат, тепловий комфорт, плоский струміль, подача повітря, турбулізація повітряного потоку.

Стаття надійшла до редакції 13.08.2025

Стаття прийнята до друку 2.09.2025

Дата публікації статті 24.09.2025

[This work by](#) © 2025 by [Chemerynskyi Y., Voznyak O.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

TECHNOLOGY OF EDUCATIONAL INSTITUTIONS' RECONSTRUCTION AFTER
DESTRUCTION CAUSED BY ARMED CONFLICT ON THE TERRITORY OF
UKRAINE RIGIDITY

¹**Atynian A.O.**, PhD, Associate Professor,
Armen.Atynyan@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6667-6869

¹**Savchenko O.I.**, PhD, Associate Professor,
Oleksandr.Savchenko @kname.edu.ua, ORCID: 0009-0005-6667-6869

¹*O.M. Beketov National University of Urban Economy*
17, Chernoglazivska str., Kharkiv, 61002, Ukraine

²**Kamchatna S.M.**, PhD, Associate Professor,
kamchatnayasn@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5711-4146

²**Rybachuk O.V.**, Senior Lecturer,
rybachuk@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2467-833X

²*Ukrainian State University of Railway Transport*
square Oboronnyi Val, 7, Kharkiv, 61002, Ukraine

³**Nazarko O.O.**, PhD, Associate Professor,
olganazamail@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3496-8533

³*Kharkov National Automobile and Highway University*
25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Abstract. The article is of a review nature and is devoted to the analysis of modern trends in technologies for the restoration of secondary education institutions after destruction as a result of the armed conflict in Ukraine. It substantiates the urgent need to develop a new, forward-looking model for restoring educational infrastructure, grounded in the principles of energy efficiency, technological innovation, resilience, and elevated safety standards. In the context of post-war recovery, education is recognized as a critical pillar for societal stability and sustainable development, making the reconstruction of schools a strategic priority for the country.

The study includes a thorough analysis of the existing regulatory and legal framework that governs reconstruction efforts. Key stages of the construction and design cycle are outlined, such as structural assessment of damaged buildings, development of project and technical documentation, coordination of civil protection strategies, and implementation of construction and installation activities. Special focus is placed on the engineering and architectural aspects of building safe and resilient educational spaces capable of withstanding future threats.

Furthermore, the article explores the integration of protective infrastructure, such as reinforced shelters, early warning systems, and optimized evacuation paths, into school design. Beyond physical protection, the study emphasizes the psychological and emotional well-being of students and educators. This includes the adoption of human-centered architectural approaches, inclusive spatial planning, and flexible, adaptive design that meets the diverse needs of school communities.

A comprehensive reconstruction model is proposed, incorporating innovative building technologies, resource-efficient and sustainable materials, and a strategic methodology tailored to post-conflict conditions. This integrated approach aims to create durable, functionally advanced, and socially safe educational environments that respond to both current challenges and future demands.

Keywords: reconstruction, educational facilities, rebuilding, educational environment safety, energy efficiency, innovative technologies, civil protection shelters, infrastructure resilience.

Introduction. The armed conflict on the territory of Ukraine, which began in 2014 and escalated into a full-scale war in February 2022, has caused significant destruction to civilian infrastructure, particularly general secondary education institutions (Fig. 1). The restoration of

educational infrastructure has become one of the top priorities for the state, local communities, and international partners.

The process of rebuilding general secondary education facilities requires a comprehensive approach that combines modern technologies, innovative materials, and advanced design methods while taking into account new safety requirements. The reconstruction of damaged schools, kindergartens, colleges, and universities must not only restore their physical structures but also ensure the creation of a safe, comfortable, and modern educational environment that meets the needs of a post-conflict society.



Fig. 1. Damaged educational facility

Analysis of Recent Research and Publications. The process of restoring damaged general secondary education institutions is regulated by a number of legal acts, standards, and methodological guidelines. The foundational documents in this field include the Law of Ukraine *"On Regulation of Urban Development Activities"*, the State Building Codes (DBN), and specialized methodological recommendations developed by the Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine and other relevant authorities.

In 2022–2023, special methodological guidelines were developed and approved for drafting design assignments for the reconstruction of damaged school buildings, which define the key requirements for the educational infrastructure restoration process [1, p. 5]. These guidelines cover issues such as technical condition assessments, design documentation development, scope of work

determination, and cost estimation for reconstruction.

An important aspect of regulatory support is the design standards approved by the National Council for the Recovery of Ukraine, which establish baseline parameters for rebuilding general secondary education institutions, taking into account modern safety, energy efficiency, and functionality requirements [2, p. 12]. These standards mandate the inclusion of civil protection shelters, early warning systems, backup power sources, and water supply systems in reconstruction projects.

Purpose and Objectives. The purpose of this study is to develop a comprehensive, scientifically grounded approach to the restoration of general secondary education institutions damaged or destroyed due to armed aggression against Ukraine, in compliance with regulatory requirements, safety standards, and innovative approaches to educational space organization. This approach involves integrating modern construction technologies, energy efficiency principles, safety measures, and psychological comfort for participants in the educational process.

To achieve this goal, the following research objectives were defined:

- to investigate modern approaches to restoring educational infrastructure, considering the complexity and multifaceted nature of this process;
- to examine the effectiveness of contemporary diagnostic methods in comprehensive technical assessments of damaged buildings;
- to assess the feasibility of implementing innovative materials and technologies for structural reinforcement and civil protection shelters;
- to identify prospective directions for further research aimed at enhancing the resilience, energy autonomy, and comfort of educational institutions.

Materials and Research Methodology. To achieve the research objectives, a comprehensive interdisciplinary approach was employed, integrating methods of technical expertise, architectural design, analysis of regulatory and legal acts, systems modeling, and socio-psychological analysis.

The material basis of the study included:

- actual data on the condition of damaged or destroyed general secondary education institutions;
- regulatory and legal acts governing design, reconstruction, and civil protection;
- results of public reports, engineering assessments, and expert conclusions obtained in collaboration with design organizations.

The research methodology comprised the following key stages:

- analysis of modern approaches to reconstruction, conducted through content analysis of scientific sources, technical documentation, and international experience in the restoration of educational infrastructure;
- assessment of the condition of damaged objects, performed using methods of visual, instrumental, and thermal imaging inspection of structures.

Main Findings and Results. *Technological Aspects of Damage Assessment and Inspection.*

The first stage in the restoration of general secondary education institutions is a comprehensive assessment of the buildings' technical condition and the extent of damage. According to the methodological guidelines developed by the Department of Economy and Investments of the Kyiv City State Administration, inspections should include: visual and instrumental diagnostics of structures, evaluation of utility networks and systems, analysis of foundation soils [3, p. 8].

Modern technologies used for high-quality inspections include:

- laser 3D scanning of buildings, which creates a precise digital model of the structure, capturing all deformations and damages. This technology ensures high measurement accuracy (up to 2 mm) and helps detect hidden defects;
- thermographic surveys using thermal imaging cameras are employed to detect hidden structural defects, heat losses, moisture anomalies, and other issues not visible during visual inspections;
- ultrasonic testing is used to assess the strength of concrete structures, identifying cracks, voids, and other material integrity issues;
- ground-penetrating Radar (GPR) is applied to analyze the condition of foundation soils,

detect underground utilities, cavities, and areas prone to flooding.

Based on the results of a comprehensive survey, a detailed report is compiled, containing information on the technical condition of structures, the nature and extent of damage, and recommendations for restoration methods. This report serves as the basis for developing design documentation and determining the scope of necessary work [4, p. 14].

Design of Restoration for Educational Institutions. The design phase of restoring damaged general secondary education institutions is a critical stage that defines all subsequent work. According to methodological guidelines developed by the Department of Urban Planning and Architecture, the design process must be based on principles of safety, energy efficiency, inclusivity, and functionality [4, p. 20].

A key aspect of design is the development of a detailed design brief, which should include:

- technical parameters of the restoration object (total area, number of floors, structural scheme, etc.);
- characteristics and parameters of elements subject to restoration;
- safety requirements (including civil protection shelters);
- energy efficiency parameters;
- requirements for engineering equipment and systems;
- requirements for the organization of educational spaces;
- features of inclusivity and accessibility.

In the design process for restoring general secondary education institutions, Building Information Modeling (BIM) technologies are widely used. This technology enables the creation of a detailed digital model of the object, incorporating information about all structural elements, engineering systems, and materials. BIM modeling ensures efficient coordination between different project sections, enables simulations and analyses (energy, acoustic, insulation, etc.), and optimizes project costs and timelines [5, p. 32].

Innovative Materials and Restoration Technologies. Modern approaches to restoring general secondary education institutions involve the use of innovative materials and technologies that ensure high quality, reliability, and speed of work. According to methodological guidelines developed by the Confederation of Builders of Ukraine, preference should be given to materials and technologies with high durability, environmental friendliness, and energy efficiency [5, p. 78].

Among the innovative materials used in restoration are:

- composite reinforcement based on basalt or fiberglass, offering high strength, corrosion resistance, and low thermal conductivity;
- self-healing concretes containing special additives that activate upon the appearance of cracks, "healing" them and ensuring long-term operation without repairs;
- next-generation thermal insulation materials, such as aerogels, vacuum panels, nanocellulose, perlite, vermiculite, and gypsum mixtures, which have extremely low thermal conductivity [6-12];
- photocatalytic coatings capable of purifying air from harmful substances and pollutants under sunlight exposure.

Among the innovative construction technologies applied in restoration are:

- 3D printing of building structures, enabling the rapid creation of complex geometric shapes with minimal waste;
- modular construction technologies, involving the production of individual modules in factories followed by on-site assembly, significantly reducing construction timelines;
- dry construction technologies using lightweight steel thin-walled structures (ISSTS), which provide high installation speed, lightweight structures, and flexibility for various architectural solutions [3, p. 92].

The restoration and strengthening of damaged structures are among the most critical aspects of restoring general secondary education institutions. Depending on the nature and extent of damage, various technologies are applied:

- for the restoration of reinforced concrete structures, composite materials based on carbon

or fiberglass fabrics are widely used, significantly increasing the load-bearing capacity of elements without substantially increasing their dimensions. These materials offer high strength, corrosion resistance, and durability [3, p. 25];

- for strengthening brick walls, reinforcement technologies using basalt fiber or stainless steel meshes followed by the application of high-strength mortars are employed. This technology significantly enhances the strength and seismic resistance of structures;

- for foundation restoration, injection technologies involving the filling of cracks and voids with special solutions, as well as the installation of additional reinforcement elements (e.g., bored piles, benches), are effective.

Special attention is given to the use of modern concretes with enhanced strength, frost resistance, and water impermeability. Specifically, self-compacting concretes, fiber-reinforced concretes, and concretes with nanoparticles are used to ensure the high quality of restored structures [2, 6-10].

Creation of Protective Structures and Safety Elements. One of the key aspects of restoring general secondary education institutions during an armed conflict is the establishment of civil protection shelters and the implementation of comprehensive safety systems. According to approved design standards, every educational institution must be equipped with a shelter compliant with the requirements of DBN V.2.2-5:2022 "Civil Protection Structures" [1, p. 30].

Technological solutions for creating shelters include:

- reinforcing existing basement premises by strengthening load-bearing structures, installing protective sealed doors and window systems, and equipping ventilation systems with filters and autonomous power sources;

- constructing separate protective structures using monolithic reinforced concrete with enhanced strength characteristics or prefabricated reinforced concrete structures designed for special purposes;

- equipping shelters with engineering systems, including air filtration systems, autonomous power sources, water reserves, and sewage systems.

In addition to shelters, critical safety elements include early warning and monitoring systems that enable timely responses to threats and organized evacuations. These systems incorporate acoustic alarms, light indicators, automated door-locking systems, and other components [5, p. 56].

Energy-Efficient Technologies in Restoration. The restoration of damaged general secondary education institutions provides a unique opportunity to implement modern energy-efficient technologies, significantly reducing energy consumption and enhancing building sustainability. According to the requirements outlined in methodological guidelines, restoration projects must ensure an energy efficiency class of at least "B" [4, p. 38].

Key energy-efficient technologies applied during restoration include:

- comprehensive thermal modernization of building envelopes using modern insulation materials (mineral wool, graphite-enhanced polystyrene, PIR and PUR panels) to achieve high thermal resistance;

- installation of energy-efficient windows and doors with triple glazing and low-emissivity coatings to minimize heat loss;

- implementation of heat recovery ventilation systems that retain up to 80% of thermal energy;

- use of various types of heat pumps (air-to-water, ground-to-water) for heating and cooling, significantly reducing the consumption of conventional energy resources;

- integration of solar collectors and photovoltaic panels to provide hot water and generate electricity;

- implementation of automated building management systems (BMS) to optimize energy consumption based on building usage patterns [6, p. 63].

Organization of Educational Space During Restoration. The restoration of general secondary education institutions offers not only the opportunity to restore the physical parameters of buildings but also to implement modern approaches to organizing educational spaces. According to methodological guidelines developed by the Ministry of Communities and Territories Development, restoration projects should provide for flexible, adaptable spaces that align with modern

pedagogical practices [5, p. 105, 13].

Key principles for organizing educational spaces include:

- creating multifunctional rooms that can be adapted based on educational tasks and students' needs;
- designing open learning spaces (open space) to foster collaboration and project-based work;
- zoning spaces to include areas for individual work, group activities, rest, and creativity;
- integrating digital technologies into physical spaces, creating "smart classrooms" with interactive surfaces and virtual or augmented reality systems.

Special attention is given to creating an inclusive environment that ensures accessibility and comfort for all participants in the educational process, regardless of their physical abilities [4, p. 118, 14, 15].

Conclusions. The restoration of general secondary education institutions after destruction caused by armed conflict is a complex and multifaceted process requiring a comprehensive approach. An analysis of modern approaches to restoring educational infrastructure highlights the need to combine innovative technologies, modern materials, and advanced design methods to ensure the safety, energy efficiency, and functionality of restored facilities.

Key technological solutions for effective restoration include comprehensive surveys using modern diagnostic methods, the application of Building Information Modeling (BIM) during the design phase, the use of innovative materials and technologies for strengthening and restoring structures, the creation of civil protection shelters, and the implementation of energy-efficient solutions.

Particular attention should be paid to approaches for organizing educational spaces, which involve creating flexible, adaptable environments that align with modern pedagogical practices and support the development of innovative educational forms.

Future research in this area should focus on developing new technological solutions to enhance the resilience of general secondary education institutions to potential threats, ensure their energy autonomy, and create a comfortable environment for all participants in the educational process.

References

- [1] "Standarty ta normy proiektuvannia". Natsionalna rada z vidnovlennia Ukrainy. 2022. [Online]. Available: https://restoration.gov.ua/4489/standarty_ta_normy/70514/70515.pdf. Accessed on: May 01, 2025.
- [2] "Rozrobleni metodychni rekomendatsii shchodo skladannia zavdannia na proiektuvannia dlia rekonstruktsii zruinovanykh budivel shkil". *Konfederatsiia budivelnykiv Ukrainy*. 2023. [Online]. Available: <https://kbu.org.ua/news/rozrobleni-metodychni-rekomendatsii-shchodo-skladannia-zavdannia-na-proiektuvannia-dlia-rekonstruktsii-zruinovanykh-budivel-shkil>. Accessed on: May 01, 2025.
- [3] "Metodychni rekomendatsii shchodo skladannia zavdannia na proiektuvannia dlia rekonstruktsii zruinovanykh budivel". Departament ekonomiky ta investytstii Kyivskoi miskoi derzhavnoi administratsii. 2023. [Online]. Available: <https://desn.kyivcity.gov.ua/news/metodychni-rekomendatsii-shchodo-skladannia-zavdannia-na-proiektuvannia-dlia-rekonstruktsii-zruinovanykh-budivel>. Accessed on: May 01, 2025.
- [4] "Rozrobleni metodychni rekomendatsii shchodo skladannia zavdannia na proiektuvannia dlia rekonstruktsii zruinovanykh budivel shkil". Upravlinnia mistobuduvannia ta arkhitektury. 2023. [Online]. Available: <https://um-osvita.gov.ua/3108-rozrobleni-metodychni-rekomendatsii-shchodo-skladannia-zavdannia-na-proiektuvannia-dlia-rekonstruktsii-zruinovanykh-budivel-shkil>. Accessed on: May 01, 2025.
- [5] "Vidbudova Ukrainy: Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorii zatverdylo Metodychni rekomendatsii shchodo rekonstruktsii zruinovanykh budivel shkil". *Kyiv Post*. 2023. [Online]. Available: <https://www.kyivpost.com/uk/post/38316>. Accessed on: May 01, 2025.
- [6] O.V. Haiduk, T.M. Herliand, N.V. Kulalaiev, N.V. Pivtoratska, T.V. Piatynchuk, *Tekhnolohii uteplennia fasadiv budivel*. Pidruchnyk. Zhytomyr: «Polissia», 2021.

- [7] V.R. Serdiuk, S.Yu. Franyshyna, O.V. Khrystich, "Orhanizatsiino-tekhnologichni zakhody termomodernizatsii zastariloho zhytloвого фонду", *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, no. 2, pp. 6-17, 2022.
- [8] DSTU 9191:2022. Teploizoliatsiia budivel. Metod vyboru teploizoliatsiinoho materialu dlia utepлення budivel. Tekhnichni komitet standartyzatsii "enerhoefektyvnist budivel i sporud" (TK 302). Derzhavne pidpriemstvo "Derzhavnyi naukovo-doslidnyi instytut budivelnykh konstruktsii". 2023.
- [9] A. Atynian, M. Dzhahalov, S. Butnik, R. Tkachenko, I. Hovorukha, "Improvement of technology of production of crushed stone-mastic asphalt concrete mixture by adding reinforcing additives", *Veda a perspektyvy*, no. 6 (37), 2024.
- [10] A. Atynian, E. Bukhanova, A. Zhyhlo, "Enerhosberezhennye pry yspolzovanny teplozoliatsyonnykh stenovokh materyalov na osnove hypsovek yzdelyi", *Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*, випуск 5, pp. 345-350, 2016.
- [11] D. Zaitsev, A. Klimchuk, G. Balasarian, "Analiz osnovnykh sposobiv termomodernizatsii budivel ta metodika ikh vprovadzhennya", *Visnik Natsionalnogo tekhnichnoho universitetu "HPI". Seriya: Yenergetichni ta teplotekhnichni protsesi y ustatkuvannya*, 1(17), pp. 156-160, 2015. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2015.17.24>.
- [12] DBN V.2.6-31:2006. Konstrukcii zdanij i sooruzhenij. Teplovaja izoljacija zdanij. Kiev: Minstroj Ukrainy, 2006.
- [13] V. Corrado, "Energy Efficiency in Buildings: A Review of Current Trends and Future Directions in the EU", *Energy and Buildings* (Elsevier), [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/329636306_Energy_efficiency_in_buildings_research_perspectives_and_trends. Accessed on: May 01, 2025.
- [14] A. Lis, "Thermal Modernization of Residential Buildings in Europe: Policies, Technologies, and Case Studies", *Sustainable Cities and Society*, 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/375279323>. Accessed on: May 01, 2025.
- [15] T. Ge, J. Peso, W-C. Yas, B.T. Tex, S. You. "Assessment of the renewable energy generation towards net-zero energy buildings", *Energy and Buildings*, 256, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111755>. Accessed on: May 01, 2025.

ТЕХНОЛОГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАКЛАДІВ ОСВІТИ ПІСЛЯ РУЙНУВАНЬ ВНАСЛІДОК ЗБРОЙНОГО КОНФЛІКТУ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

¹Атинян А.О., к.т.н., доцент,
Armen.Atynyan@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6667-6869

¹Савченко О.І., к.е.н., доцент,
Oleksandr.Savchenko @kname.edu.ua, ORCID: 0009-0005-6667-6869

¹Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,
17, вул. Черноглазівська, Харків, 61002, Україна

²Камчатна С.М., к.т.н., доцент,
kamchatnayasn@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5711-4146

²Рибачук О.В., старший викладач,
rybachuk@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2467-833X

²Український державний університет залізничного транспорту,
майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна

³Назарько О.О., к.т.н., доцент,
olganazamail@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3496-8533

³Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
вулиця Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна

Анотація. Стаття має оглядовий характер і присвячена аналізу сучасних тенденцій у технологіях відновлення закладів загальної середньої освіти після руйнувань внаслідок

збройного конфлікту на території України. Обґрунтовано актуальність формування нової моделі відновлення освітньої інфраструктури, що базується на принципах енергоефективності, технологічної інноваційності, адаптивності до нових загроз і підвищених вимог до безпеки. У контексті післявоєнного відновлення країни освіта виступає ключовою сферою, що забезпечує сталість розвитку, тому питання створення безпечного, функціонального та комфортного освітнього середовища набуває пріоритетного значення.

Здійснено системний аналіз чинної нормативно-правової бази, що регламентує процеси відновлення, з виокремленням ключових етапів проектно-будівельного циклу, таких як: обстеження технічного стану об'єкта, розробка проектно-технічної документації, узгодження рішень у сфері цивільного захисту, виконання будівельно-монтажних робіт і контроль якості виконання. Особлива увага приділена адаптації архітектурних та інженерних рішень до умов підвищеної загрози. Розглянуто інтеграцію елементів укріпленого захисту: облаштування укриттів, впровадження систем раннього оповіщення, організація безпечних маршрутів евакуації, а також використання «розумних» технологій моніторингу ризиків.

Крім забезпечення фізичної безпеки, окреслено роль архітектурної гуманізації, інклюзивного та адаптивного дизайну для створення психологічно комфортного середовища, сприятливого для навчання й соціалізації дітей різного віку. Запропоновано комплексну модель відновлення освітніх установ, яка синтезує сучасні будівельні технології, ресурсозберігаючі матеріали та системний стратегічний підхід до відновлення. Така модель орієнтована на створення довготривало стійких, соціально безпечних і функціонально ефективних навчальних середовищ нового покоління, що відповідають викликам сучасності та майбутнього розвитку.

Ключові слова: реконструкція, заклади освіти, відновлення, безпека освітнього середовища, енергоефективність, інноваційні технології, укриття цивільного захисту, стійкість інфраструктури.

Стаття надійшла до редакції 12.05.2025

Стаття прийнята до друку 15.06.2025

Дата публікації статті 24.09.2025

[This work by © 2025 by Atynian A.O., Savchenko O.I., Kamchatna S.M., Rybachuk O.V., Nazarko O.O. is licensed under CC BY 4.0](#)

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ у збірнику наукових праць “Сучасне будівництво та архітектура”

До опублікування у фаховій збірці наукових праць приймаються раніше не опубліковані наукові статті, із зазначеною нижче **тематикою публікацій**:

1. Архітектура.
2. Будівельні конструкції.
3. Будівельні матеріали та технології.
4. Гідротехнічне та транспортне будівництво.
5. Інженерні мережі та обладнання.
6. Основи та фундаменти.
7. Технологія та організація будівельного виробництва.

Стаття повинна відповідати тематиці збірника, публікуватися вперше і включати такі елементи:

- актуальність та постановку проблеми у загальному вигляді, її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;
- аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких представлено вирішення даної проблеми і на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується дана стаття;
- формулювання мети статті (постановка завдання);
- виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів;
- висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку у даному напрямку;
- список літератури.

Загальні вимоги до оформлення тексту

Статті подаються в електронному вигляді файлом Word 97 – 2003 в форматі .doc. Назва файлу має містити номер тематики публікації та прізвище першого автора (наприклад, 5 Іванов.doc).

Статті подаються українською чи англійською мовою і друкуються мовою оригіналу.

Текстова частина статті набирається на аркушах формату **A4** шрифтом **Times New Roman 12 пт** через одинарний інтервал, вирівнюється по ширині сторінки, поля по 2 см з усіх боків, абзацний відступ – 1,0 см. **Обсяг статті 7-16 повних сторінок разом з анотаціями.**

Структура статті:

- *індекс УДК* (вирівняно по лівому краю без абзацного відступу, прописний, напівжирний);
- *назва статті* (відцентрована, усі літери прописні, напівжирні, переноси не допускаються);
- *прізвище, ініціали всіх авторів, науковий ступінь, вчене звання* (вирівняно по правому краю, прізвище – напівжирний; ступінь і звання – рядковий);
- *повна назва вищого навчального закладу чи організації* (курсив, вирівняно по правому краю; якщо автори з різних навчальних закладів, то кожен автор з окремого рядка);

- *електрона пошта* (вирівняно по правому краю та поряд унікальний номер ORCID);
- *анотації до статті* (абзацний відступ, назва напівжирна, анотації пишуться двома мовами: українською і англійською).

Текст першої анотації пишеться мовою основного тексту статті та повинен бути **не менш як 1800 знаків**.

Текст другої анотації, якщо видання не є повністю англійськомовним, кожна публікація не англійською мовою супроводжується анотацією англійською мовою обсягом **не менш як 1800 знаків**. Якщо видання не є повністю українськомовним, кожна публікація не українською мовою супроводжується анотацією українською мовою обсягом **не менш як 1800 знаків**. Друга анотація розміщується в кінці статті після списку літератури на англійській мові.

Дві анотації повинні коротко повторювати структуру статті, що включає вступ, мету, методику, результати, висновок. Машинний переклад **не дозволяється**.

- *ключові слова* (міжрядковий інтервал не робиться, абзацний відступ, назва напівжирна, текст ключових слів не більше 6–8 слів).

Назва статі, прізвище і ініціали, науковий ступінь, вчене звання, місце роботи, анотація і ключові слова – повторюються українською та англійською мовами.

Між рядками з індексом УДК, назвою статі, прізвищем авторів, анотацією, основним текстом і переліком літератури, літературою на англійській мові та другою анотацією одинарний інтервал.

- *Основний текст статті*.

Структура основного тексту статті згідно з постановою ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 р. (Бюлетень ВАК України №1, 2003 р.) повинна мати такі необхідні елементи (*назви структурних елементів в тексті статті потрібно виділити напівжирно*):

- вступ (постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями);

– аналіз останніх джерел досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми (бажано, щоб це був аналіз останніх публікацій у фахових журналах) і на які опирається автор, виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття;

- постановка мети та завдання (формулювання мети та завдань досліджень);

– матеріали та методи дослідження (опис використаних матеріалів та методів дослідження проблеми, що розглядається у статті);

– основний матеріал і результати (виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів);

– висновки (наукова новизна, наукове та практичне значення результатів дослідження, перспективи подальших наукових розроблень);

– *література* (відцентрована, напівжирна; посилання в тексті подають у квадратних дужках [2]; список літератури наводиться відповідно порядку посилань у тексті згідно з ДСТУ 8302:2015 та записується в стовпчик; написання «Джерела інформації», «Перелік літератури» **не допускається**). Бібліографічний список наводиться мовою оригіналу та транслітерується. Кількість посилань на літературні джерела у статті повинно бути не менше 15 джерел. Особлива увага приділяється сучасним англійськомовним статтям, зокрема індексованих WoS або Scopus.

– *бібліографічний список (References)*. Для відтворення українських власних назв засобами англійської мови при перекладі публікації англійською мовою застосовується транслітерація. Найменування організацій та установ, що не перекладаються на англійську мову, також транслітеруються. Транслітерація прізвищ авторів виконується залежно від мови оригіналу джерела відповідно до вимог Постанови Кабінету Міністрів України від 27.01.2010 р. № 55 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею». Бібліографічний список повинен бути оформлений з використанням стилю *IEEE STYLE* згідно з «Міжнародним стилем цитування та посилання в наукових роботах», Київ, 2016.

Таблиці слід виконувати в редакторах Word без заливання. Кожна таблиця має бути надрукована з відповідним заголовком та нумерацією після першого посилання на неї.

Ширина таблиць не повинна перевищувати поля сторінки. Шрифт в таблиці повинен відповідати шрифту статті.

Формули мають бути виконані в редакторі формул *Equation 3.0* чи *MathType* з використанням тільки загальноприйнятих шрифтів (Times New Roman; Symbol). Кожна формула набирається як один об'єкт, нумерація формул арабськими цифрами справа в дужках вирівняна по ширині сторінки.

Рисунки (діаграми, фото), подаються у чорно-білому, кольоровому варіанті або у градаціях сірого кольору після першого посилання на них; мають бути згруповані та являти собою один графічний об'єкт; мати нумерацію та підпис позначення ось координат. Розміри підписів на рисунку повинні відповідати шрифту Times New Roman 12 пт.

Разом зі статтею подаються:

- відомості про автора (авторська довідка): прізвище, ім'я, по батькові (повністю); вчене звання, вчений ступінь; посада, місце роботи; контактні адреси й телефони; поштова адреса, на яку надсилати примірник збірника
- рецензія на статтю, якщо автором є аспірант без співавторів з вченим ступенем та вченим званням.

Статті, які не відповідають наведеним вимогам, до розгляду не приймаються.

Подані матеріали підлягають додатковому рецензуванню членами редколегії або провідними фахівцями за науковими напрямками, тому можуть бути повернені авторам на доопрацювання.

Остаточне рішення щодо публікації статті приймає редакційна колегія видання.

Відхилений оригінал не повертається.

Оплата здійснюється тільки після підтвердження прийняття статті до друку.

Вартість публікації статті **1100 грн**. Збірник виходить 4 рази на рік щоквартально, в кінці кожного кварталу. Статті необхідно надсилати до 1 числа останнього кварталу (наприклад, якщо збірник виходить в кінці червня, то статті приймаються до 1 червня). Але прийом статей може закінчитись раніше вказаного терміну, якщо буде набрано необхідну кількість сторінок.

Матеріали надсилати за адресою:

Редакція «Сучасне будівництво та архітектура»
Одеська державна академія будівництва та архітектури,
вул. Дідрихсона, 4
м. Одеса, 65029, Україна
Контактна особа: Антонюк Надія Романівна
тел. роб. (048) 70-00-608
e-mail: visnuk_odaba@ogasa.org.ua
Сайт збірника: <http://visnyk-odaba.org.ua/>

Платіжні реквізити:

Центр НТТМ по АБ, код **21028281**,
МФО **320478**, Р/р **UA 10320478000026009924861812** в ПАТ АБ «Укргазбанк»,
Призначення платежу: «Сучасне будівництво та архітектура, ПІБ першого автора»

Просимо після відправлення матеріалів обов'язково зателефонувати або зв'язатися електронною поштою, щоб упевнитися в отриманні матеріалів та рішенні редакційної колегії щодо публікації статті.

Наукове видання

СУЧАСНЕ БУДІВНИЦТВО ТА АРХІТЕКТУРА

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

**Випуск № 13
вересень 2025**

Головний редактор *Вировой В.М.*

Технічний редактор *Антонюк Н.Р.*

Підписано до друку 24.09.2025 р.
Формат 60×84/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Цифровий друк. Ум.-друк. арк. 15,81.
Наклад 100 прим. Зам. №20-29Е

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