

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 № 10
грудень 2024**

ОДЕСА 2024

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

Випуск № 10, грудень 2024

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’язаних 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;

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 № 5 від 26.12.2024 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)

© Одеська державна академія
будівництва та архітектури
(ОДАБА), 2024

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

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESSA STATE ACADEMY
OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

***MODERN CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE***

COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS

**Issue № 10
December 2024**

ODESSA 2024

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

Issue № 10, December 2024

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 Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, since 2000.

Founder and publisher – Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (OSACEA), Odessa. 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, Odessa 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, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture;

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

Plugiu 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, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture;

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

Recommended for publication by the Academic Board of the OSACEA

Protocol № 5, 26 December, 2024.

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)**

© Odessa State Academy
of Civil Engineering and Architecture
(OSACEA), 2024

ЗМІСТ

АРХІТЕКТУРА

Лужний С.А., Жигалюк С.С. «Дух місця» як нематеріальний чинник впливу на просторове планування.....	9
---	---

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

Волкова В.Є., Коврова В.О. Вплив зміни типу перерізу колон каркасних будівель.....	17
--	----

Крутій Ю.С., Сур'янінов М.Г., Перпері А.О., Вакуленко В.В., Теорло Н.А. Аналітичний розрахунок балки, що опирається на пружну основу вінклера з експоненціальною неоднорідністю.....	27
--	----

Мурашко О.В., Волощук В.В. Ретроспективний аналіз вимог нормативних документів з сейсмостійкого будівництва до будинків з кам'яного мурування	37
---	----

Фесун І.К., Вабіщевич М.О., Лукашевич Д.Ю. Аналіз закордонного досвіду дослідження випадків прогресуючого обвалення будівель і споруд	45
---	----

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

Барабаш І.В., Горбовий О.Л. Будівельний розчин на механоактивованому портландцементі з добавкою меленого вапняку	54
--	----

Давидчук В.Г., Барабаш І.В. Механоактивація змішаного в'язучого та її вплив на міцність будівельного розчину.....	61
---	----

Довгань О.Д., Вировой В.М., Довгань П.М., Макарова С.С. Роль дискретної арматури в організації мікроструктури декоративних композитів.....	69
--	----

Кровяков С.О., Шимченко П.В. Вплив заміни частини цементу золою-винесенням на міцність бетонів транспортних споруд і дорожніх покриттів	82
---	----

Семенова С.В., Левицький Д.В. Неруйнівний метод оцінки стану структури поверхні каменю-черепашника.....	89
---	----

Цапко Ю.В., Бондаренко О.П., Цапко О.Ю., Мазурчук С.М., Касянчук І.О., Ющенко А.В. Міцність теплоізоляційних деревополімерних матеріалів.....	97
---	----

ГІДРОТЕХНІЧНЕ ТА ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Хонелія Н.Н., Бугаєва С.В., Лопатін К.О. Застосування інноваційних матеріалів в сучасному гідротехнічному будівництві.....	106
--	-----

ІНЖЕНЕРНІ МЕРЕЖІ ТА ОБЛАДНАННЯ

Гулай Б.І., Кузь О.Ф., Бундзило В.П.

Аналіз коефіцієнту корисної дії децентралізованих систем вентиляції з рекуперацією
теплоти..... 117

Шаповал С.П., Пришляк Ю.В., Івацишин Ф.О., Бундзило В.П.

Моделювання теплових процесів у гібридному геліоколекторі 126

Вимоги до оформлення статей у збірнику Сучасне будівництво та архітектура..... 134

CONTENTS

ARCHITECTURE

- Luzhnyi S., Zhyhaliuk S.**
«Spirit of place» as an intangible factor influencing spatial planning..... 9

BUILDING STRUCTURES

- Volkova V., Kovrova V.**
The impact of changing the type of cross-section of columns of frame buildings..... 17
- Krutii Yu., Surianinov M., Perperi A., Vakulenko V., Teorlo N.**
Analytical calculation of a beam based on an elastic winkler foundation with exponential inhomogeneity..... 27
- Murashko O.V., Voloshchuk V.V.**
Retrospective analysis of the requirements of regulatory documents for seismic resistant construction of masonry buildings..... 37
- Fesun I.K., Vabishchevich M.O., Lukashevych D.Y.**
Analysis of foreign experience in research cases of progressive collapse of buildings and structures 45

BUILDING MATERIALS AND TECHNIQUES

- Barabash I.V., Gorbovyi O.L.**
Construction mortar based on mechanoactivated portland cement with the addition of ground limestone 54
- Davidchuk V.G., Barabash I.V.**
Mechanoactivation of mixed binding agent and its influence on the strength of construction mortar..... 61
- Dovgan O.D., Vyrovoy V.M., Dovgan P.M., Makarova S.V.**
Role of discrete reinforcement in the organization of the microstructure of decorative composites..... 69
- Kroviakov S.O., Shymchenko P.V.**
The effect of partial replacement of cement with fly ash on the strength of concrete for transportation structures and road pavements 82
- Semenova S.V., Levytskyi D.V.**
Non-destructive method for assessing the state of the surface structure of shell limestone..... 89
- Tsapko Yu., Bondarenko O., Tsapko A., Mazurchuk S.N., Kasyanchuk I., Yushchenko A.**
Strength of heat-insulating wood-polymer materials..... 97

HYDROTECHNICAL AND TRANSPORT CONSTRUCTION

- Khoneliia N.N., Bugaeva S.V., Lopatin K.O.**
Application of innovative materials in modern hydrotechnical engineering 106

UTILITY NETWORKS AND FACILITIES

Hulai B., Kuz O., Bundzylo V.

Analysis of the effectiveness coefficient of decentralized ventilation systems with heat recovery..... 117

Shapoval S.P., Pryshliak Y.V., Ivashchyshyn F.O., Bundzylo V.P.

Modelling of thermal processes in a hybrid solar collector..... 126

Requirements for the articles formation in collection Modern construction and architecture..... 134

«SPIRIT OF PLACE» AS AN INTANGIBLE FACTOR INFLUENCING SPATIAL PLANNING

¹**Luzhnyii S.**, postgraduate student,
stanislavroman.luzhnyikurylych@gmail.com, ORCID: 0009-0000-7003-7579
¹**Zhyhaliuk S.**, bachelor,
serhii.zhyhaliuk@gmail.com, ORCID: 0009-0004-9940-6373
¹*King Danylo University*
35, E. Konovaltsia str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine

Abstract. The article explores the role of the «spirit of place» as an intangible factor in organizing urban spatial planning. It examines the significance of cultural heritage and national identity in shaping urban landscapes, describing how they foster a sense of belonging and attachment to a place. A method is proposed for integrating these factors into the urban planning process, enabling the creation of more sustainable and attractive urban spaces that resonate with historical and cultural contexts.

The concepts of «city spirit», «spiritual comfort», and «architectural code» are analyzed in detail, highlighting their features and interconnections. The «spirit of place» is considered a key element that shapes the unique identity of a location, influencing people's emotional perception and behavior. The importance of considering historical, cultural, religious, and social aspects in the formation of the architectural environment is emphasized.

Special attention is given to intangible aspects such as cultural heritage, traditions, folklore, and spirituality, which need to be integrated into urban planning decisions. This is particularly relevant in the context of post-war city reconstruction, where human needs, social cohesion, and the preservation of national identity should be prioritized.

Methods for using the «spirit of place» to create or transform architectural environments that consider the needs of different population groups and promote the preservation of cultural uniqueness are also proposed. An analysis of contemporary studies reveals the necessity of developing clear recommendations for implementing innovative solutions that take into account the ecological, socio-economic, political-legal, historical, and cultural characteristics of Ukrainian cities. Equally important is the creation of approaches for involving the public in the process of urban space transformation and modeling practical applications of the «spirit of place» concept in architectural design. Integrating these approaches will allow for the creation of comfortable urban spaces with high aesthetic and cultural value, contributing to the formation of a positive city ensemble and enhancing the quality of life for residents. The research emphasizes the importance of preserving historical memory, which will foster a deep sense of national belonging among the Ukrainian people.

The article proposes approaches that can form the basis for creating effective urban development strategies, taking into account the cultural and historical aspects that define the uniqueness of each place.

Keywords: «spirit of place», intangible factors, spatial planning, urban environment, architecture planning, national identity, spiritual comfort, «architectural code».

Introduction. Spirituality is an integral part of human life that creates a sense of comfort, higher meaning, and the eternity of existence. The spiritual aspect of cities is often overlooked by both society and architects, yet it plays a significant role in creating impressions of the urban ensemble, its «face». Cities should be designed to be spiritually comfortable. To achieve this, spiritual criteria such as faith, culture, mentality, etc., need to be included in architectural and urban planning decisions, especially in the context of modern challenges. The historical and cultural context of a city plays a crucial role in forming its spiritual identity. Understanding the collective consciousness and traditions of the people is key to fostering the spiritual enrichment of the

architectural environment [1].

Intangible elements such as cultural heritage, history, traditions, folklore, spirituality, etc., need to be taken into account in urban planning decisions. This is especially relevant in the reconstruction of cities after the war, where human needs and social factors should be prioritized, preserving the memory of history, culture, and national identity for future generations over mere physical infrastructure [2].

Understanding the historical and national contexts of architectural and urban development is crucial for preserving the integrity and unity of ethnic cultures. This involves considering the importance of large-scale regional cultural characteristics to support the preservation of cultural identity [3].

The key idea of the article is the integration of historical and cultural aspects, particularly the factor of the «spirit of place», into urban planning processes, which can significantly improve the quality of life for residents, fostering the development of nationally distinctive urban environments. This will not only enhance the aesthetic value of cities but also create a deeper sense of national belonging and identity among the Ukrainian people.

Analysis of recent research and publications. The impact of the «spirit of place» on the development, construction, and transformation of the architectural environment is indirectly and, rarely, directly examined in the studies of contemporary domestic and foreign scholars. In the direction of the social and economic aspects of urban development, researchers such as Gabriel M., Kosmyi M., and Gabriel T. [1] consider spiritual comfort and the «spirit of the city» as an urban phenomenon that emphasizes the importance of social aspects of urban environment development. In their works, Gabriel M., Gabriel M., and Forkutsa L. [2] study the formation of the spatial planning knowledge base in Ukraine, which is important for improving the efficiency of urban territory management. Kosmyi M. [4] also analyzes the semiotic nature of the spatial structure of the modern city, which allows understanding the influence of symbolic and communicative aspects on the perception of the urban environment.

Regarding spatial organization and planning, Gabriel M. and Dobrovolska M. [5] study the concepts of revival and spatial development of Ukraine and its regions, which are important for the strategic planning of urban space transformation. Approaches to spatial planning are also analyzed by Petrakovska O. and Mykhailova M. [6], Gabriel M., Dobrovolska M., Dobrovolska M., and Forkutsa L. [7], providing an understanding of the evolution, current state of this field, and the implementation of planning solutions. Gabriel M., Kosmyi M., and Gabriel M. [8] also consider the intangible contexts in the concept of the «smart» city, which is important for understanding the integration of new technologies in urban planning.

Another important aspect of the «spirit of place» concerns the transformation of urban space and cultural landscape. In particular, the studies of Hladka A. [9], Parneta M. [10], Silnyk O., and Solovii L. [11] explore the transformations of the cultural landscape, the influence of landscape-spatial factors on the formation of the media architecture and urban spaces, and analyze the formation of residential areas. These studies provide an understanding of the general trends of changes in Ukrainian cities, the impact of external factors on the perception of the urban environment, and the historical aspects of urban space development. The analysis of the achievements and development of architectural and urban construction heritage objects of Ukraine, which is important for considering the historical context during the transformation of urban centers, conducted by Balaniuk Y. [12] and the work of Buravchenko S. [13], dedicated to scenario models of the perception of architectural objects in pedestrian spaces, which is important for understanding human interaction with the urban environment, deserve special attention.

Based on the analysis of recent research and publications, it would be appropriate to form definitions of the following concepts: «spirit of the city», spiritual comfort, «architectural code», «spirit of place».

The «spirit of the city» is an intangible factor that defines the identity and character of a city, influencing how residents and visitors feel the urban life, history, and culture of the city [1].

Spiritual comfort is a feeling of inner peace, safety, and well-being that people experience in the urban environment, provided it is properly formed, reflected in local customs, traditions, and other regional characteristics [1].

The «architectural code» can be considered a semiotic system that conveys meaning through design, which may include local ornaments, architectural and design elements unique to this area, and the planning of urban spaces that may also vary depending on the historical-geographical region. It reflects the relationship between the built environment and the cultural identity of the city, influencing how the population perceives and interacts with the surrounding environment. The «architectural code» refers to a set of principles that govern the design and construction of urban spaces. It encompasses various aspects, including aesthetics, functionality, spiritual, and historical-cultural significance of buildings in the city [4].

Modern research suggests that the issue of the «spirit of place» requires separate consideration and more thorough research, as it leaves room for the following tasks:

- developing specific recommendations for implementing innovative solutions, considering the social, economic, historical, and cultural characteristics of Ukrainian cities;
- developing mechanisms for public involvement in the process of urban space transformation;
- developing recommendations for using intangible factors, particularly the «spirit of place», for constructing the architectural environment.

Objective and Tasks. The aim of the article is to deepen the understanding of the «spirit of place», the influence of cultural and historical factors on its formation, and its impact on the development of new urban strategies that ensure the harmonious integration of historical-cultural and nationalist ideas into modern concepts of architectural environment construction. According to the aim, the following objectives are addressed:

- to define the «spirit of place» as an intangible factor in architecture;
- to determine which category of intangible factors the «spirit of place» belongs to;
- to analyze the main factors influencing the «spirit of place»;
- to develop recommendations for using the «spirit of place» in the construction of the architectural environment.

Materials and Research Methodology. In this article, to comprehensively analyze the concept of the «spirit of place», the factors influencing it, and to define its areas of influence, the following scientific research methods were used:

- the systematic review method involved reviewing existing studies and publications on the topic of the «spirit of place», spiritual comfort, «architectural code», and other related concepts presented in modern scientific works;
- the categorization and classification method was used to classify the «spirit of place» as an intangible factor and to analyze it in the context of various categories of intangible factors;
- the contextual analysis method was applied to examine the «spirit of place» in different contexts, including «smart» cities, cultural landscapes, historical development of cities, national identity, etc.;
- the deductive method was used to draw conclusions about the specifics of the «spirit of place» and its impact on spatial planning, based on general theoretical provisions about intangible factors;
- the synthesis method allowed integrating various aspects of the «spirit of place» to create recommendations for its use in architecture and urban planning.

Main Material and Results. *I. Categorization of the «Spirit of Place» as an Intangible Factor.* To categorize the «spirit of place» as an intangible factor, it is necessary to define it. The «spirit of place» is a narrower concept than the «spirit of the city». It is also an intangible aspect, but it defines the identity and character of a more specific location, which can be an individual object or a particular area. It is formed under the influence of history, culture, religion, etc. It is the factor that creates certain psycho-emotional connections between a person and a place, imposing appropriate behavior specific to that place and eliciting special emotions and internal experiences. There might be a misconception that the «spirit of place» is synonymous with the term «semantics in architecture», but there is a fundamental difference: the «spirit of place» and semantics in architecture, although related to the understanding and perception of the architectural environment, focus on different aspects. The first term concentrates on the cultural and spiritual context of the place, while the second on the symbolic and communicative functions of architectural forms.

Intangible factors include: mental-ethical, aesthetic-landscape, political-administrative (normative), historical-cultural, and religious-spiritual [14]. The question arises as to which of these categories the «spirit of place» best belongs to. Determining its category may depend on the context in which this concept is considered, as well as the characteristics of the locality and its historical development. This can lead to different perceptions and interpretations of the «spirit of place» depending on the cultural, social, and political conditions prevailing at a particular time.

It is advisable to consider the «spirit of place» in the context of each of these categories to determine to which one it belongs. Mental-ethical factors are the intangible embodiment of the existing needs of society. They are reflected in architecture through the patterns of placement of buildings, structures, transportation hubs, etc., in a city, oriented to the values and convenience of society at a particular time. Here, it is appropriate to mention the concept of a «smart» city, which is significantly influenced by mental-ethical factors [14]. The «spirit of place» is one of the key aspects in building «smart» cities, emphasizing the importance of cultural identity, national values, and unique features that define the «spirit of the city». In the development of a «smart» city, it is important to integrate this intangible factor along with technological achievements in science and technology. This ensures that city development focuses not only on efficiency and technology but also on improving quality of life and preserving historical and cultural heritage [8]. Integrating the «spirit of place» into «smart» city planning can justify efforts to achieve sustainable development. By prioritizing local values and contributions of folk creativity and inventiveness, cities can develop projects that address environmental issues while enhancing the overall quality of life for residents. This approach aligns with the idea of creating a comprehensive system that considers both material and intangible aspects of city life [8, 15]. Thus, the «spirit of place» embodies not very pronounced features of mental-ethical intangible factors.

In the concept of aesthetic-landscape intangible factors, the «spirit of place», as one of the main components of cultural landscapes, shapes the characteristics and nature of the urban environment. It is important to consider that the material essence of a cultural landscape is determined not only by landmarks with corresponding legal statuses but also by places and landmarks valued and associated by local residents with their histories and feelings [9]. The «spirit of place» influences the visual perception and emotional connection of people with their surroundings. It plays a significant role in creating a sense of belonging to a place and attracting tourists through the beauty of natural and urban landscapes. In the architectural composition of a city, the «spirit of place» intertwines with the concept of aesthetic and landscape intangible factors, influencing the overall well-being of the built environment. Understanding the «spirit of place» is crucial for creating meaningful and colorful spaces that resonate with people on a deep spiritual level [10, 14]. From this, it can be concluded that the «spirit of place» affects aesthetic-landscape intangible factors, raising doubts about whether it belongs to them.

The «spirit of place» cannot be attributed to the category of political-administrative intangible factors in architecture, as it is more of a cultural and emotional component influencing the perception of a place [6, 14]. Although political-administrative factors may indirectly influence the «spirit of place» through regulations and political strategies related to the preservation of historical-cultural heritage or the development of the urban environment, the «spirit of place» itself is unlikely to depend on such factors [13, 14]. On the contrary, it plays a significant role in forming these normative factors, dictating to the authorities through the voices of the population a list of places and objects that should have special statuses [7, 13, 14].

The concept of the «spirit of place» can be interpreted through religious and spiritual senses, as it encompasses the intangible essence and power believed to dwell in certain places, influencing people and their interactions in these places [14, 16]. In a religious and spiritual context, the spirit of place may be associated with sacred sites, pilgrimage places, or areas believed by locals to have mystical connections, where people feel something beyond physical sensations [14, 17]. The sacred significance of the «spirit of place» can be seen in how certain objects evoke feelings of awe, reverence, and veneration, prompting people to participate in cultural mysteries, traditions, etc., to connect with the spiritual force that fills these spaces. The religious-spiritual component of the «spirit of place» imbues architectural elements with meanings, influencing the activities of sacred spaces, temples, churches, mosques, or other sacred objects intended to improve people's spiritual state [14, 16]. Based on this, the

«spirit of place» can be considered a religious-spiritual intangible factor in architecture.

The concept of the «spirit of place» also has historical significance, as it intertwines with the evolution of architectural styles over years, decades, centuries, millennia. It reflects the cultural heritage and traditions of a specific place, preserving the memory of the rises and struggles of the people, which find their embodiment in the interiors, exteriors, and ensembles of the architectural environment. Artists and scientists have explored the «spirit of place» through various artistic artifacts, preserving the significance of historical and cultural elements in urban landscapes. It is important to understand the evolutions of architectural elements, urban infrastructure, and social-moral changes reflecting the historical context of the place. The «spirit of place» serves as a historical-cultural factor. This creates special emotional connections between people and a particular place, evoking feelings of anger, joy, calm, nostalgia, etc., reflecting cultural values, beliefs, traditions, personal experiences, etc., permeating that particular place. Artists and architects often draw inspiration from the cultural essence of the place to create meaningful designs [14, 16, 18]. Through the lens of historical and cultural factors, the «spirit of place» becomes a dynamic element that evolves with social changes, technological advancements, and urban transformations. It acts as a link between the past, present, and future, preserving the cultural heritage and historical memory of the place in its architectural environment [14, 17, 18]. In summary, the «spirit of place» belongs simultaneously to two categories of intangible factors: religious-spiritual and historical-cultural.

II. Preconditions Forming the «Spirit of Place». Several factors influencing the «spirit of place» can be identified:

- The historical component of the place, including its architectural evolution and historical heritage, significant events that occurred there, forms the basis of the «spirit of place». Understanding historical events and oral folklore, such as myths and legends, embedded in the architectural environment, has a colossal impact on the success of forming the «spirit of place» when building new or rethinking the previous architectural environment [1, 6, 14].

- The cultural component of the place, encompassing its inherent values, beliefs, and traditions, plays a significant role in forming the «spirit of place» [1, 13, 14, 16].

- Architectural styles and urban planning principles applied in different regions create various «spirits of places». Design elements, unique building materials and constructions, and specific spatial layouts reflect the cultural color of the locality, forming its spirit [1, 5, 11, 13, 14].

- Emotional connections people have with a place, influenced by personal experiences, memories, and interactions in the surrounding environment, create a unique «spirit of place». For someone, it might be their old school, for others their first workplace, where they finally gained independence from their parents, or perhaps a place associated with their worst memories [5, 19].

III. Recommendations for Using the «Spirit of Place» in Building the Architectural Environment. The following approach is proposed for utilizing the «spirit of place» in building the architectural environment:

- Begin by delving into the historical significance of the place where the architectural environment exists or is planned. This requires analyzing historical narratives, legends, local stories, architectural styles inherent to the place, and its historical-cultural landscape, to use elements imbued with the «spirit of place» [12, 18].

- After studying the historical-cultural picture, start integrating new cultural elements inherent to the place into the architectural environment to emphasize the cultural identity of the locality. It is crucial not to ignore symbols, ornaments, motifs, and other cultural features of the region to preserve or create a unique architectural environment where new traditions, customs, and values will continue to exist or emerge, contributing to a sense of belonging to a unique regional culture and tradition in such an architectural environment [9, 10, 12, 17].

- It is extremely important, when creating or rethinking the architectural environment, to preserve or create new emotional connections between people and the surrounding environment. Design elements that evoke positive emotions and memories, memorials to tragedies, victories, and significant events, buildings constructed in reinterpreted historical styles enhance the connection with the place, evoking a variety of emotions that will make people want to return there again and again [5, 6, 19].

– Do not forget about implementing sustainable development strategies aimed at preserving the natural environment, which will contribute to the preservation of the «spirit of place». Promote the use of environmentally friendly building materials, energy-efficient systems, and the creation of green spaces that harmoniously blend with the surrounding environment and contribute to ecology conservation [19].

– It is recommended to involve local communities in the architectural environment design process to ensure that their values, desires, and needs are reflected. Close collaboration with local residents, investors, and experts from various fields, including culture, history, and ethnography, will allow the creation or rethinking of the architectural environment so that it corresponds to the aspirations and color of the local population, fostering a sense of ownership and control over their land [5, 19].

– Lastly, apply adaptive reuse strategies for renovating and revitalizing existing structures while preserving their historical and cultural significance. Transforming old buildings into functional spaces that honor the historical-cultural heritage of the place, blending the past with the present, to create a dynamic architectural environment that tells the story and provides an insight into the unique culture of the locality [13].

Conclusions:

Summarizing the research, it is worth emphasizing that the «spirit of place» is an important aspect that belongs simultaneously to two categories of intangible factors: religious-spiritual and historical-cultural. It influences the formation of the architectural environment's identity. Using historical, cultural, religious, and aesthetic contexts in urban planning processes contributes to creating spiritually comfortable and nationally distinctive spaces.

The recommended approach to integrating an intangible factor like the «spirit of place» can create architectural environments that preserve and develop local customs, traditions, and other historical-cultural features of regions while meeting modern technological requirements, promoting social cohesion, and preserving and developing national ideas.

The research highlighted the importance and relevance of involving local communities in the processes of planning, designing, and constructing architectural spaces to preserve and popularize local colors, myths, legends, customs, and traditions, while not ignoring the needs and desires of modern individuals.

Using the «spirit of place» as an intangible factor in spatial planning is impossible without studying the locality's history, integrating new cultural elements into the historical-cultural concept of such a place, creating strong emotional ties between the local population and new concepts of rethought architectural environments, and implementing sustainable development strategies aimed at preserving and restoring ecology.

The appropriateness of renovation and revitalization when restoration is impossible or impractical to preserve unique architectural elements that embody the «spirit of place» has been emphasized.

Thus, considering the «spirit of place» is an integral part of the spatial planning process, allowing the creation of nation-oriented, ethnically distinctive cities with their «spirit of the city», unique features such as regional cuisines, unique architectural elements, traditions, and customs, attracting both residents and tourists.

Prospects for further research may focus on developing specific recommendations for implementing innovative solutions considering the social, economic, historical, and cultural characteristics of Ukrainian cities; developing mechanisms for involving the public in the process of urban space transformation; improving recommendations for using the «spirit of place» in building the architectural environment, and developing recommendations for using other intangible factors in constructing the architectural environment.

References

- [1] M. Habrel, M. Kosmii, T. Habrel, "Dukhovnyi komfort i dukh mista yak urbanistychnyi fenomen", *Prostorovi rozvytok*, no. 3, pp. 173–196, 2023. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.3.173-196>

- [2] M. Habrel, M. Habrel, L. Forkutsa, "Do pyttannya formuvannia bazy znan prostorovoho planuvannia v Ukraini", *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, no. 84, pp. 6–27, 2023. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.84.6-27>
- [3] V. Timokhin, N. Shebek, "Kontseptualni zasady rozvytku arkhitekturno-mistobudivnoi spadshchyny v etnichnykh rehionakh Ukrainy", *Suchasni problemy Arkhitektury ta Mistobuduvannia*, no. 69, pp. 184–199, 2024. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.69.184-199>
- [4] M. Kosmii, "Semiotychnyi kharakter prostorovoi struktury suchasnoho mista: masyv", *Komunalne hospodarstvo mist*, no. 6, pp. 85–90, 2020. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-6-159-85-90>
- [5] M. Habrel, M. Dobrovolska, "Poshuk kontseptsii vidrodzhennia ta prostorovoho rozvytku Ukrainy i yii rehioniv: pohliad arkhitekтора", *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, no. 80, pp. 59–79, 2022. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.80.59-79>
- [6] O. Petrakovska, M. Mykhalova, "Pidkhody do prostorovoho planuvannia: retrospektyva ta suchasnyi stan", *Prostorovyi rozvytok*, no. 1, pp. 117–128, 2022. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2022.1.117-128>
- [7] M. Habrel, M. Dobrovolska, M. Dobrovolska, L. Forkutsa, "Prostorove planuvannia na lokalnomu rivni v Ukraini", *Prostorovyi rozvytok*, no. 6, pp. 165–182, 2023. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.6.165-182>
- [8] M. Habrel, M. Kosmii, M. Habrel, "Nematerialni konteksty v kontseptsii "rozumnoho" mista", *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, no. 86, pp. 243–260, 2024. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.86.243-260>
- [9] A. Hladka, "Transformatsiia kulturnoho landshaftu Kyieva v period nezalezhnosti Ukrainy", *Ukrainski kulturolohichni studii*, no. 1(10), pp. 51-56, 2022. [https://doi.org/10.17721/UCS.2022.1\(10\).09](https://doi.org/10.17721/UCS.2022.1(10).09)
- [10] M. Parneta, "Landshaftno-prostorovi chynnyky vplyvu na formuvannia mediinosti arkhitektury ta miskyykh prostoriv Lvova", *Suchasni problemy Arkhitektury ta Mistobuduvannia*, no. 64, pp. 105–118, 2022. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2022.64.105-118>
- [11] O. Silnyk, L. Solovii, "Poslidovnist formuvannia kompozytsiino-stylovoho oseredku zhytlovoi zabudovy Lvova", *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, no. 80, pp. 368–377, 2022. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.80.368-377>
- [12] Ya, Balaniuk, "Dosiahnennia ta problemy naukovooho doslidzhennia, zberezhennia ta rozvytku ob'ektiv arkhitekturno-miskoho budivnytstva kulturnoi spadshchyny Ukrainy", *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnikha". Serii: "Arkhitektura"*, no. 4(1), pp. 10-20, 2022. <https://doi.org/10.23939/sa2022.01.010>
- [13] S. Buravchenko, "Variatsii stsenarnykh modelei spryiniattia u chasi ob'ektiv arkhitektury v pishokhidnykh prostorakh", *Suchasni problemy Arkhitektury ta Mistobuduvannia*, no. 63, pp. 42–66, 2022. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2022.63.42-66>
- [14] M. Kosmii, "Nematerialni chynnyky v prostorovii orhanizatsii ta rozvytku mist", *Suchasni problemy Arkhitektury ta Mistobuduvannia*, no. 56, pp. 218–233, 2020. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.56.218-233>
- [15] V. Pryimak, "Perspektyvni tendentsii arkhitekturnoi transformatsii zhytlovo-hromadskykh tsentriv velykykh mist", *Suchasni problemy Arkhitektury ta Mistobuduvannia*, no. 64, pp. 194–208, 2022. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2022.64.194-208>
- [16] A. Bludov, "Osoblyvosti kontseptualnoho pidkhodu suchasnykh ukrainskykh khudozhnykiv u zhanri miskoho peizazhu", *Zbirnyk naukovykh prats "Ukrainska akademiia mystetstva"*, no. 29, pp. 22-29, 2020. <https://doi.org/10.33838/naoma.29.2020.22-29>
- [17] I. Dyda, "Ukrainski miski tradytsii: aktualnist v umovakh suchasnykh vyklykiv", *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnikha". Serii: "Arkhitektura"*, no. 4(2), pp. 79-86, 2022. <https://doi.org/10.23939/sa2022.02.079>

- [18] A. Hlushchenko, "Narysy istorii mistobuduvannia v Ukraini ta sviti", *Dorohy i mosty*, no. 29, pp. 183–197, 2024. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.183>
- [19] V. Semko, "Stale terytorialno-prostorove planuvannia v konteksti vidnovlennia Ukrainy – vyznachennia, pryntsypy, kryterii ta zavdannia", *Prostorovyi rozvytok*, no. 1, pp. 254–267, 2022. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2022.1.254-267>

«ДУХ МІСЦЯ» ЯК НЕМАТЕРІАЛЬНИЙ ЧИННИК ВПЛИВУ НА ПРОСТОРОВЕ ПЛАНУВАННЯ

¹Лужний С.А., аспірант,
stanislavroman.luzhnykurylych@gmail.com, ORCID: 0009-0000-7003-7579

¹Жигалюк С.С., бакалавр,
serhii.zhyhaliuk@gmail.com, ORCID: 0009-0004-9940-6373

¹ЗВО «Університет Короля Данила»
вул. Є. Коновальця, 35, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна

Анотація. У статті досліджується роль «духу місця» як нематеріального чинника в організації просторового планування міського середовища. Розглядається значення культурного надбання та ідентичності народу у формуванні міських ландшафтів, описуючи, як вони сприяють виникненню відчуття приналежності та прив'язаності до місця. Пропонується спосіб інтеграції цих факторів у процес містобудування, що дозволяє створювати стійкіші та привабливіші міські простори, які резонують з історичним та культурним контекстом.

Детально аналізуються поняття «дух міста», «духовний комфорт» та «архітектурний код», виділяючи їх особливості та взаємозв'язки. «Дух місця» розглядається як ключовий елемент, що формує унікальну ідентичність локації, впливаючи на емоційне сприйняття та поведінку людей. Підкреслюється важливість врахування історичних, культурних, релігійних та соціальних аспектів при формуванні архітектурного середовища.

Особлива увага приділяється нематеріальним аспектам, таким як культурна спадщина, традиції, фольклор та духовність, які необхідно інтегрувати в містобудівні рішення. Це особливо актуально в контексті повоєнної реконструкції міст, де пріоритетом повинні бути людські потреби, соціальна згуртованість та збереження національної ідентичності.

Також запропоновані методи використання «духу місця» для створення чи трансформації архітектурного середовища, яке враховуватиме потреби різних груп населення та сприятиме збереженню культурної самобутності. Проведено аналіз сучасних досліджень в якому виявлено необхідність розробки чітких рекомендацій щодо впровадження інноваційних рішень, які будуть враховувати екологічні, соціально-економічні, політико-правові, історичні та культурні особливості українських міст. Також не менш важливим є створення підходів до залучення громадськості в процес трансформації міського простору та моделювання рішень щодо практичного застосування концепції «духу місця» в архітектурному проектуванні. Інтеграція цих підходів дозволить створити комфортні міські простори з високою естетичною та культурною цінністю, які сприятимуть формуванню позитивного ансамблю міста та підвищенню якості життя мешканців. Дослідження наголошує на важливості збереження історичної пам'яті, яка буде формувати в українського народу глибоке відчуття національної приналежності.

В статті запропоновані підходи, які можуть стати основою для створення ефективних стратегій міського розвитку та будуть враховувати культурні та історичні аспекти, що визначають унікальність кожного місця.

Ключові слова: «дух місця», нематеріальні чинники, просторове планування, архітектурне середовище, національна ідентичність, духовний комфорт, «архітектурний код».

Стаття надійшла до редакції 27.11.2024

THE IMPACT OF CHANGING THE TYPE OF CROSS-SECTION OF COLUMNS OF FRAME BUILDINGS

Volkova V., Dr. Sci. (Tech), Professor,
*Dnipro State Agrarian and Economic University,
National University "Zaporizhzhia Polytechnic"*
*Ukrainian State University of Science and Technologies Educational and Scientific Institute
"Prydniprovaska State Academy of Civil Engineering & Architecture"*

drvev09@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1883-1385
25 Serhiy Yefremov Street, Dnipro, 49000, Ukraine

Kovrova V., graduate student,
*Ukrainian State University of Science and Technologies Educational and Scientific Institute
"Prydniprovaska State Academy of Civil Engineering & Architecture"*
kovrovaviktoriiia@gmail.com, ORCID: 0009-0001-7733-7395
24A Architect Oleh Petrova Street, Dnipro, 49000, Ukraine

Abstract. Nowadays, the construction of multi-storey buildings is becoming increasingly important, leading to an increasing building density and the development of transport infrastructure. Recently, the volume of construction in areas exposed to vibrations of various nature has been steadily increasing. Constant impact of vibrations caused by external factors, such as traffic flows or industrial plants, on buildings can cause significant displacements of structural elements and increase noise levels, which is an additional negative effect on the safe operation of the building. Thus, the problem of controlling the impact of these vibrations on the reliability and durability of a building is becoming increasingly important.

Reducing the impact of frequencies on the structural characteristics of structures and on the normal functioning of the human body is implemented by vibration isolation of buildings and structural monitoring systems. However, the effect of changing the cross-sections of structural elements has not been fully investigated.

The aim of this work is to find rational cross-sectional shapes of columns in terms of material consumption and suitability for normal exploitation of multi-storey reinforced concrete frame buildings.

To analyse the effect of changing the cross-section of the columns, 3 variants of the column cross-section were developed, in which the shapes and geometric dimensions were changed. The geometric characteristics of the cross-sections were calculated using the Arbat software, and the modal analysis was performed using the SCAD software package.

As a result of the calculation, the interaction curves were obtained, which limit the area of the section's bearing capacity under the action of forces that can be applied to the section under analysis. In particular, the natural frequencies and shapes of vibrations were obtained, and the cross-sections of the columns were estimated by their area and moments of inertia. The changes in the type of column cross-section did not significantly affect the level of vibration frequencies of the building. However, it did change the material consumption and weight of the building by 24%, meaning that the values of the loads from the columns' own weight transmitted to the foundation also decreased. Reducing the loads on foundations can significantly reduce the cost of their construction. It was also found that a change in the type of section can affect the changing of the direction of movement of the building's vibration forms.

The results of the study demonstrate the possibility of optimising structural solutions by changing the geometry of columns, which not only saves resources but also ensures reliable operation of buildings.

Keywords: multi-storey reinforced concrete buildings, finite element method, numerical modeling, modal analysis, natural frequencies, rational cross-sectional shapes, form of oscillation.

Introduction. In today's environment, the construction of multi-storey buildings is becoming increasingly relevant, leading to an increase in building density and the development of transport infrastructure. Recently, the volume of construction in areas exposed to various vibrations has been steadily increasing. The constant impact of vibrations on buildings can cause significant displacements of structural elements and increase noise levels, which is an additional negative effect on the safe functioning of the building. Thus, the problem of controlling the impact of these vibrations on the reliability and durability of the building is becoming increasingly relevant. For this purpose, there is a need to monitor the state of structures on prototype design models using modal analysis [1].

Analysis of recent research. Modern urbanisation trends and the growing demand for high-rise buildings dictate the need to optimise materials and structures to ensure cost-effectiveness and energy efficiency. At the same time, increasing traffic and industrialisation are creating additional dynamic loads on buildings, which requires a more detailed investigation of their impact on structural elements.

The problems of cross-sectional shape formation of load-bearing structures are one of the fundamental problems. Traditionally, in the process of rational cross-section selection, architectural, structural and technological requirements are taken into account simultaneously, which in most cases conflict with each other. Sometimes approaches to reducing the material intensity of structures are in conflict with the requirements of simplicity of manufacturing technology, installation and even operation [2, 3].

In the last twenty years the traditional requirements of stability, strength and rigidity of structures have been supplemented by the need to check the structure for progressive collapse. It is known that the dominant influence on the formation of progressive collapse scenarios is exerted by the dynamic characteristics of the structure, and this phenomenon has already been realized in American standards. In view of this, the set of structural requirements described above is becoming wider.

Estimation of the natural frequency spectrum of structures was originally used to prevent resonance phenomena during operation. The natural frequencies of structures can be estimated analytically using approximate formulas. However, modal analysis provides more detailed and reliable data on the dynamic behavior of structures.

Despite the variety of software systems that implement the finite element method, not all of them allow to model reinforced concrete structures and perform their examination for compliance with construction standards. Application of computational complexes requires not only knowledge of mechanical properties of materials and geometry of structures, but also understanding of joint operation of individual structures. The peculiarities of the transition from structural to computational schemes of buildings and structures, as well as the fundamentals of computational mechanics are outlined in [4, 5].

The interest in the modal characteristics of buildings is not limited to the prediction of resonance phenomena. Today, modal characteristics are also used to assess possible damage. This is demonstrated in the research of mid-rise buildings in the works of L. Gaile, L. Ratnika, and L. Pakrastins [1, 3]. These studies have demonstrated the high efficiency of modal analysis and the importance of optimising design solutions to improve the reliability and cost-effectiveness of construction. In particular measures of various kinds are being implemented to reduce the impact of frequencies on the structural characteristics of structures and on the normal functioning of the human body: vibration isolation of buildings and structural health monitoring systems [3]. However, the option of changing the cross-sections of structural elements has not been fully investigated.

It is known from the theory of structures [4] that the study of the effect of loads on structural elements is combined with the analysis of the rigid and inertial properties of the structure and is related to the problems of predicting dynamic behaviour.

Analysing the dynamic behaviour of multi-storey buildings can not only improve performance but also minimise the risk of damage in seismically active regions. Thus, optimisation of column cross-sections can be an important factor in reducing construction costs, especially in areas with restrictions on foundation loads.

The aim of this work is to find rational cross-sectional shapes of columns in terms of material consumption and suitability for normal exploitation of multi-storey reinforced concrete frame buildings.

Materials and methodology of the study. In this study, it is necessary to investigate changes in the mass and stiffness of structures, taking into account the forms of movement and changes in frequencies for different types of cross-sections, in accordance with the equation of dynamics [5]:

$$M\ddot{\bar{y}} + K\dot{\bar{y}} = \bar{p}, \quad (1)$$

where $\bar{y} = (y_1, y_2)^T$ – is the vector of displacements for the period T; y_1, y_2 – coordinates of the mass position; \bar{p} – is the vector of vertical force action on the mass m ; M – is the mass matrix:

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix}. \quad (2)$$

K is the stiffness matrix:

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 + s_2 \cos^2 \alpha & -s_2 \sin \alpha \cos \alpha \\ -s_2 \sin \alpha \cos \alpha & +s_2 \sin^2 \alpha \end{pmatrix}, \quad (3)$$

where s_1, s_2 – is the elongation stiffeners; α – is the angle between linearly elastic rods carrying a concentrated mass m .

The structural scheme of the building is frame. The rigidity of the system is ensured by rigid bracing between columns and beams, as well as two stiffening cores [6]. The building foundation is slab and rigidly anchored. The building's structural elements are made of heavy concrete of strength class C25. The dimensions of the building in plan are 18×58 m, the height of the floor is 4.2 m. The building has 5 above-ground and 1 basement floors. The construction area is the city of Dnipro (Ukraine).

The cross-sectional dimensions of the columns are determined by architectural, structural, and technological requirements, so the considered cross-sections in all three variants do not exceed 500 mm along the outer contour.

The analysis was performed for 3 column cross-sectional shapes. The first of them has rectangular columns with dimensions of 500×500 mm. The second variant has I-section columns with dimensions of 500×500 mm with a shelf width of 180 mm, and the third has columns with a shelf width of 150 mm. Cross sections of the columns are shown in Figure 1.

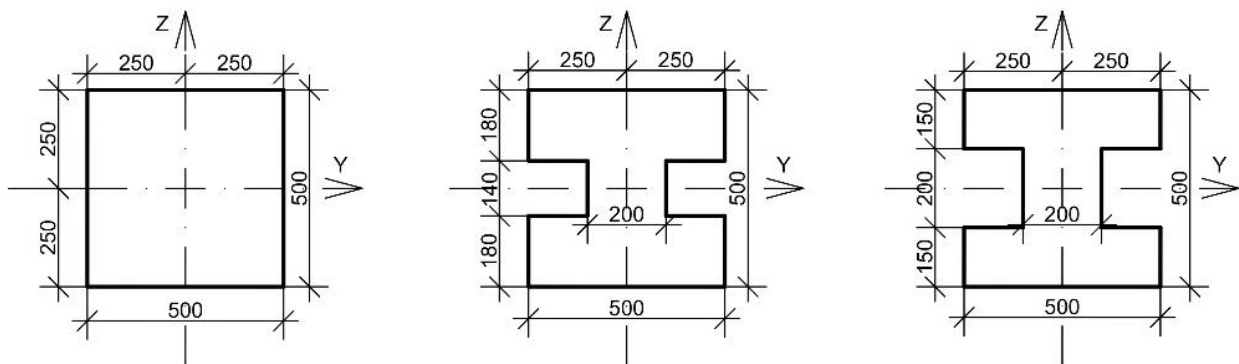


Fig. 1. Geometric dimensions of column sections

To calculate the geometric characteristics of the cross-sections for all three variants of the columns, the Arbat program, which is part of the SCAD computing software package, was used [6]. The calculation results are presented in Table 1.

According to the results obtained, it can be concluded that the cross-sectional area from the first to the third variant decreases by 24%, which characterizes a corresponding decrease in material consumption and weight of structures. The values of the moments of inertia also decrease from the first to the third case. For the moment of inertia relative to the central axis Y_1 parallel to the Y axis (I_y), this

reduction reaches about 4%, for the moment of inertia relative to the central axis Z1 parallel to the Z axis (I_z) – more than 37%, for the moment of inertia in free torsion (I_t) – more than 80%.

As a result of the calculation, the graphs of interaction curves were obtained using the Arbat program. These curves limit the area of bearing capacity of a section under the action of forces that can be applied to the cross-section being analyzed. These graphs for all types of sections are shown in Figure 2.

Table 1 – Characteristics of column sections

	Rectangular columns 500×500	I-section columns (shelf height 180)	I-section columns (shelf height 150)
Cross-sectional area (A), [cm ²]	2500	2080	1900
Moment of inertia relative to the central axis Y1 parallel to the axis Y (I_y), [cm ⁴]	520833	513973	500833
Moment of inertia relative to the central axis Z1 parallel to the axis Z (I_z), [cm ⁴]	520833	384333	325833
Moment of inertia in free torsion (I_t), [cm ⁴]	881250	231733	165833

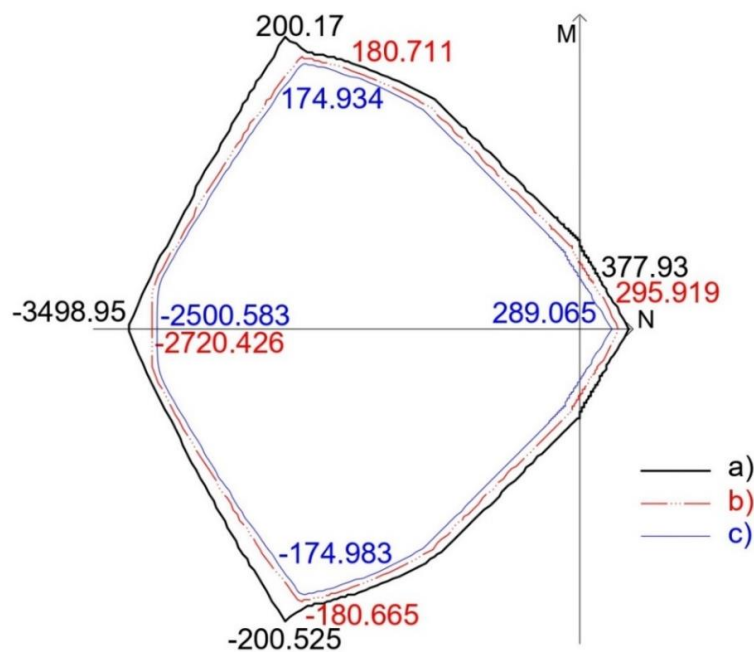


Fig. 2. Interaction curves:

a – 500×500 mm rectangular columns; b – I-section columns (180 mm shelf height); c – I-section columns (150 mm shelf height)

The design schemes were created using the SCAD software package, which implements the finite element method [7]. This method is basic in the analysis of structures in structural mechanics. Performing model discretization, which involves the distribution of structures into finite elements, is a very important and responsible process. This is due to the need to ensure the greatest relevance between the model and the structure [8]. The further reliability of the calculation depends on this. Thus, to ensure the accuracy of the calculation, elements of different shapes and sizes are used depending on the purpose of the task.

In the design scheme of the building, the columns are modeled using bar elements, and the floor slabs are modeled using plate elements. Bar elements are the simplest in the calculation of bar structures by the finite element method and can consist of two or more nodes. To create a discrete

model of a two-dimensional area, two-dimensional finite elements are used, namely triangles and quadrilaterals, which can have a different number of nodes [9]. To ensure the most optimal discretization of the model, rectangular and triangular elements are used for two-dimensional structural elements. The use of the latter is due to the need to correctly ensure working conditions in the areas where columns adjoin floors.

According to the program definition, slabs are discretized as quadrilateral or triangular finite element shells, which were calculated using the Kirchhoff-Love plate theory.

The Kirchhoff-Love plate theory, or classical plate theory, was developed by Love [10], based on the assumptions proposed by Kirchhoff [11]. This theory is widely used in engineering science and practice to analyze the behavior of thin plates in the presence of lateral loading or bending moments along the plate boundary.

This theory operates on several key assumptions [12]. Firstly, it assumes that throughout the deformation process, the median surface of the plate remains neutral, meaning that the deformation in the median plane is neglected. Secondly, it postulates that the points on the plane perpendicular to the center surface remain on the plane perpendicular to the center surface after deformation. Thirdly, it asserts that the normal stress component in the thickness direction (σ_{zz}) is negligible compared to the in-plane normal stresses (σ_{xx} and σ_{yy}).

For small deflections of the plate, linearization is applied, and the curvature κ of any given plane parallel to the midplane is expressed by the deflection w . The following relations can be obtained using the angle of inclination of the plate β_i at a point in the i -th direction and the in-plane displacements u_x and u_y [13].

$$\begin{aligned} \beta_x &:= w_{,x} & \beta_y &:= w_{,y} \\ u_x &:= -\sin(\beta_x)z \approx -\beta_x z & u_y &:= -\sin(\beta_y)z \approx -\beta_y z \\ \kappa_x &:= -\beta_{x,x} = -w_{,xx} & & \\ \kappa_y &:= -\beta_{y,y} = -w_{,yy} & \kappa_{xy} &:= -\beta_{x,y} = -w_{,xy} = -\beta_{y,x} = \kappa_{yx} \end{aligned} \quad (4)$$

The deformations in the x and y directions due to pure bending of a thin plate at a distance z from the neutral midplane can be expressed as follows [12]:

$$\epsilon_{xx} = u_{x,x} = z\kappa_x, \quad \epsilon_{yy} = u_{y,y} = z\kappa_y. \quad (5)$$

The non-zero components of the shear strain are of the form:

$$\Upsilon_{xy} = \Upsilon_{yx} := u_{x,y} + u_{y,x} = \beta_{x,y} + \beta_{y,x} = -2zw_{,xy} = 2z\kappa_{xy}. \quad (6)$$

Deformations in the Kirchhoff-Love theory of plates are linear functions of the distance from the midplane of the surface z and the second derivatives of the midplane deflection, which are equal to the corresponding curvatures at any given point.

The normal stress components are integrated over the thickness of the plate, resulting in expressions for the bending moments m_x and m_y and the torsional moment m_{xy} [13]:

$$m_x := \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{xx} z dz, \quad m_y := \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_{yy} z dz, \quad m_{xy} = m_{yx} := \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} z dz. \quad (7)$$

Similarly to the normal stress components, the shear stress components are integrated over the thickness of the plate, resulting in shear forces [13]:

$$q_x := \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xz} z dz, \quad q_y := \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{yz} z dz. \quad (8)$$

Using the above equations 7 and 8, the linearized local balance of linear and angular moments, taking into account the surface load per unit area $p(x, y)$, is as follows [13]:

$$q_{x,x} + q_{y,y} = -p \quad (9)$$

$$m_{xy,x} + m_{y,y} = -q_y \quad (10)$$

$$m_{x,x} + m_{y,y} = -q_x \quad (11)$$

Substituting q_x and q_y into 9 and using $m_{xy} = m_{yx}$ from 7, we obtain the local equilibrium in terms of bending and torsional moments per unit length of the plate [13]:

$$m_{x,xx} + 2m_{xy,xy} + m_{y,yy} = -p. \quad (12)$$

The generalized linear-elastic Hooke's law for the analysis of plane stresses, neglecting the normal stress components acting transversely to the median surface with Young's modulus E and Poisson's ratio ν , is as follows:

$$\epsilon_{xx} := \frac{1}{E}(\sigma_{xx} - \nu\sigma_{yy}), \quad \epsilon_{yy} := \frac{1}{E}(\sigma_{yy} - \nu\sigma_{xx}), \quad \gamma_{xy} = \frac{2}{E}(1+\nu)\tau_{xy}. \quad (13)$$

Using equations 4, 5, and 7, the defining relationship is expressed in terms of moments per unit length and plate bending stiffness K :

$$\begin{aligned} m_x &= -K(w_{,xx} + \nu w_{,yy}) \\ m_y &= -K(w_{,yy} + \nu w_{,xx}) \\ m_{xy} &= -K(1-\nu)w_{,xy} \text{ with } K = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Substitution of these expressions into the local equilibrium 12 leads to the defining linear partial differential equation of the Kirchoff-Love plate bending:

$$w_{,xxxx} + 2w_{,xxyy} + w_{,yyyy} = \frac{p}{K} \text{ or } \Delta^2 w = \frac{p}{K}. \quad (15)$$

In a large number of software packages that use the finite element method, the process of element division is automated [14]. The type of finite elements of the building is a quadrangle, and the number of design elements and nodes is 50305 and 40231, respectively. To check the convergence of the results, different sizes of finite elements were used. As a result, the calculation results turned out to be close in value. The design scheme is shown in Figure 3.

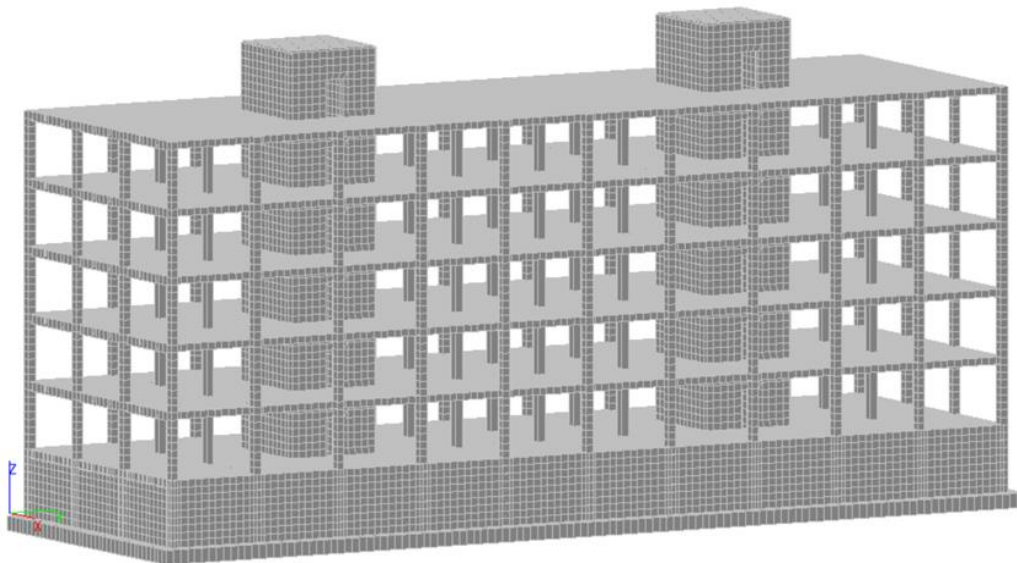


Fig. 3. Structural scheme

The developed design schemes take into account the effects of constant, long-term and short-term loads. Thus, the strength of the building structures was calculated, stress and displacement fields were obtained, in particular, the modal analysis of natural frequencies was performed.

The modal analysis provides data on the dynamic behavior of the building, which consists in determining the main forms of oscillations and their corresponding natural frequencies [1]. The results of the modal analysis are necessary to optimize the building structure to increase its stability and reduce vibrations and stresses in materials [15].

The calculation of buildings was performed using the multifrontal method in the SCAD software package [5, 7]. This method is based on the Gaussian method. This method provides for

the parallelism of the locations and exclusions of the already collected equations. The ordering of equations is carried out using heuristic approaches, which involves the creation of several fronts [5].

Research results. As a result of the modal analysis, natural frequencies and vibration forms were obtained. The graphic results of the calculation are shown in Figures 4-6.

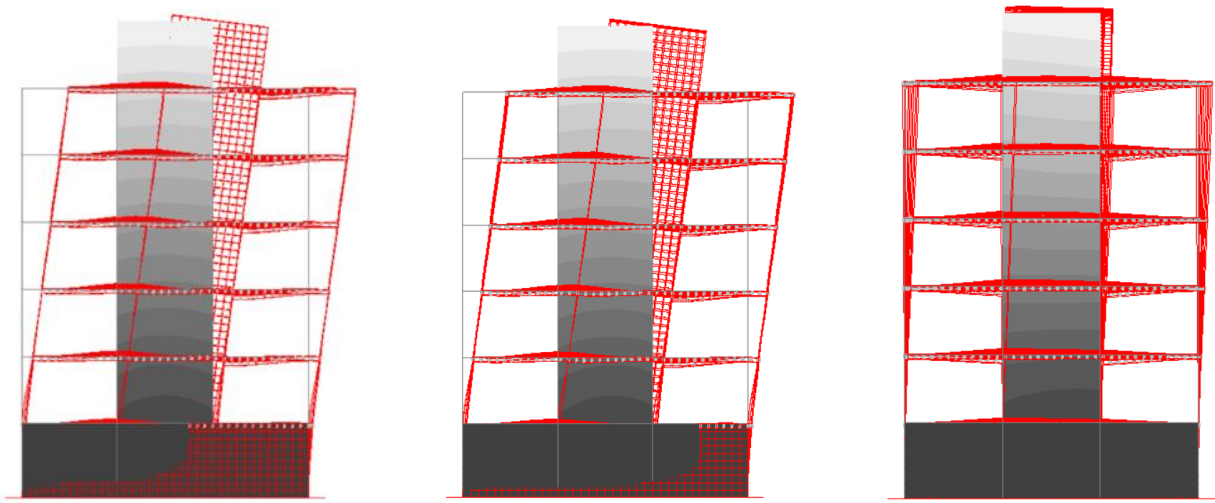


Fig. 4. The first form of oscillation:
 a – 500×500 mm rectangular columns; b – I-section columns (180 mm shelf height); c – I-section columns (150 mm shelf height)

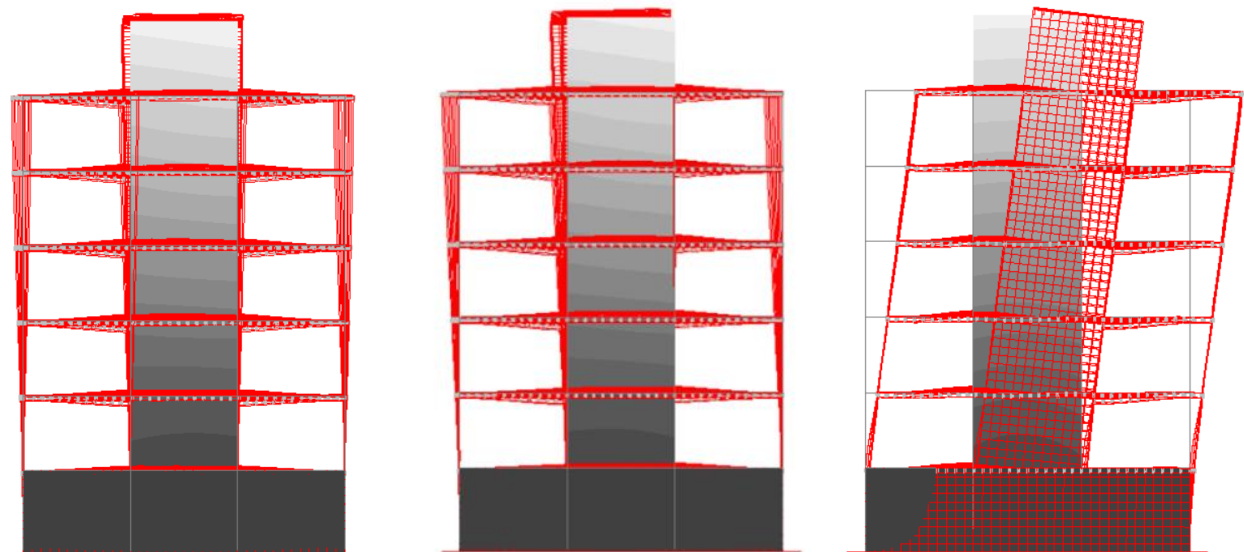


Fig. 5. The second form of oscillation:
 a – 500×500 mm rectangular columns; b – I-section columns (180 mm shelf height); c – I-section columns (150 mm shelf height)

The number of forms was determined based on the percentage of the collected effective modal masses in accordance with the requirements of DBN B.1.1-12:2014 [16]. The first 10 forms of each variant of the design schemes are considered in more detail [7, 17]. The modal analysis was performed for all three cross-sectional variants.

According to the program's reports on eigenvalues and frequencies, it can be concluded that the change in cross-section had a minimal effect on these indicators. In terms of percentage, the difference between the I-section and the rectangular section did not reach more than 10%. However, as a result of changing the types of cross-sections, there is a change in the directions of movement of the modes. Thus, in the first form, in the calculations with rectangular and I-section columns with

a shelf width of 180 mm, the movement occurs along the X-axis, and in the model where the columns are represented by an I-section with a shelf width of 150 mm - along the Y-axis, as shown in Figure 4. In the second form of natural oscillations, in the first two of these computational models, translational motion is carried out along the Y axis, and in the last scheme - along the X axis, as shown in Figure 5. In other forms of natural oscillations, the change in direction or type of motion is minimal, as shown in Figure 6.

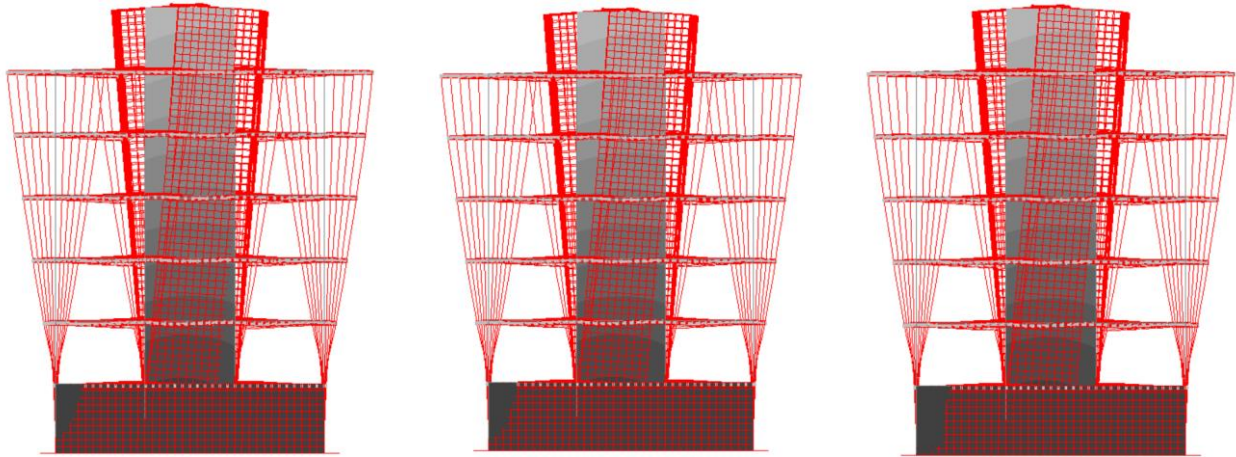


Fig. 6. The third form of oscillation:

- a – 500×500 mm rectangular columns; b – I-section columns (180 mm shelf height);
- c – I-section columns (150 mm shelf height)

According to the results obtained, it can be concluded that the change in the type of column cross-section did not significantly affect the level of the building's vibration frequencies. However, it did affect the change in material consumption and weight of the building by 24%, as well as the moments of inertia. In particular, it was found that changing the type of cross-section can affect the change in the direction of movement of the building's vibration forms.

Conclusion. As a result of the investigation, important data were obtained on the effect of changes in the geometry of the cross-section of columns on the dynamic behaviour of multi-storey reinforced concrete frame buildings.

Changing the type of column cross-section can significantly reduce the material consumption and weight of a building. The research showed that by switching from a rectangular cross-section to an I-shaped cross-section, the cross-sectional area of the columns is reduced by 24%. This reduces the weight of the structure, which in turn reduces the load on the foundation and helps to save money during the design and construction phases.

The modal analysis showed that changing the geometry of the column cross-section affects the direction of movement of the building's vibration forms, but does not have a significant impact on the values of the natural vibration frequencies. For all three cross-sectional variants considered, the frequency changes do not exceed 10%. This indicates that it is possible to optimise structures without significantly affecting their dynamic stability.

The analysis showed that the transition to I-shaped column sections significantly reduces the moments of inertia, especially the free torsion moment (I_t), which decreased by 80%. This change may affect the behaviour of structures under combined loads, which should be taken into account in further design.

The obtained results indicate the feasibility of using I-shaped column sections in the construction of multi-storey buildings, where material savings and reduced foundation loads are important. Reducing the dead weight of structures has a positive effect on the overall costs and duration of the construction of the facility.

According to the obtained results it is advisable to extend the study to a larger number of section types that correspond to modern materials and technologies.

References

- [1] L. Gaile, L. Ratnika, L. Pakrastins, "RC Medium-Rise Building Damage Sensitivity with SSI Effect", *Materials*, vol. 15, no. 5, pp. 1653, 2022. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15051653>.
- [2] L. Skoruk, "Features of the calculation of reinforced concrete elements under the action of transverse force according to different standards", *Building constructions. Theory Pract.*, vol. 13, pp. 139–148, 2023. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.139-148>.
- [3] L. Gaile, I. Radins, "Evaluation of vibration-based global structural health monitoring method for medium-rise buildings", *Environment. Technologies. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, vol. 1, pp. 55-61, 2021. URL: <https://doi.org/10.17770/etr2021vol1.6598>
- [4] V.A. Bazhenov, Yu.V. Vorona, A.V. Perelmuter, *Budivelna mekhanika i teoriia sporud. Narysy z istorii*, Kyiv: Caravela, 2016.
- [5] V.A. Bazhenov, A.V. Perelmuter, O.V. Shyshov, *Budivelna mekhanika. Kompiuterni tekhnologii i modeliuvannia*, Kyiv: Caravela, 2009.
- [6] V. Kovrova, V. Volkova, L. Pakrastins, "Modal Analysis of a Multi-storey Frame Building with Consideration of the Soil Base", *Modern Building Materials, Structures and Techniques*, vol. 392, pp. 668-673, 2024. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44603-0_69.
- [7] V.S. Karpylovskiy, E.Z. Kryksunov, A.A. Maliarenko, A.V. Perelmuter, M.A. Perelmuter, S. Iu. Fyalko, *SCAD Office.Versyia 23.Vichyslytelni kompleks SCAD++*, Kyiv: Yzdatelstvo «SCAD SOFT», 2024.
- [8] S.I. Homeniuk, V.Iu. Kozub, "Parallelna realizatsiia metodu skinchenynykh elementiv dlia zadachi termoprzhnosti", *Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, vol. 5, no. 275, pp. 5-9, 2022. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-256-8-5-9>.
- [9] Metod kintsevih elementiv. [Online]. URL: https://stud.com.ua/54925/tovaroznavstvo/metod_kintsevih_elementiv/ Accessed on: May 3, 2024
- [10] A.E.H. Love, "The small free vibrations and deformation of a thin elastic shell", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 179, pp. 491–546, 1888. URL: <https://doi.org/10.1098/rsta.1888.0016>.
- [11] A. Cazzani, L. Rosati, P. Ruge, "The contribution of Gustav R. Kirchhoff to the dynamics of tapered beams", *Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, vol. 97, no. 10, pp. 1174-1203, 2017. URL: <https://doi.org/10.1002/zamm.201600250>
- [12] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells*, New York, McGraw-Hill, 1959.
- [13] G.A. Holzapfel, *Nonlinear Solid Mechanics: A Continuum Approach for Engineering*, John Wiley & Sons, 2000.
- [14] W.K. Liu, S. Li, H. S. Park, "Eighty Years of the Finite Element Method: Birth, Evolution, and Future", *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 29, pp. 4431–4453, 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09740-9>.
- [15] V. Kovrova, V. Volkova, "Analysis of the influence of different soil types on the natural frequencies of multi-storey reinforced concrete buildings", *Strength of Materials and Theory of Structures*, vol. 111, pp. 172-177, 2023. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.172-177>.
- [16] DBN V.1.1-12:2014, *Budivnytstvo v seismichnykh raionakh Ukrainy*, Minregion Ukrainy, Kyiv, 2014.
- [17] A. Gee, S.M. Hashemi, "Undamped Free Vibration Analysis of Functionally Graded Beams: A Dynamic Finite Element Approach", *Applied Mechanics*, vol. 3, no. 4, pp. 1223-1239, 2022. URL: <https://doi.org/10.3390/applmech3040070>.

ВПЛИВ ЗМІНИ ТИПУ ПЕРЕРІЗУ КОЛОН КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ

Волкова В.Є., д.т.н., професор,

Дніпровський державний аграрно-економічний університет,

Національний університет «Запорізька політехніка»

Український державний університет науки і технологій Навчально-науковий інститут

«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

drvev09@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1883-1385

вул. Сергія Єфремова, 25, Дніпро, 49000, Україна

Коврова В.О., аспірантка,

Український державний університет науки і технологій Навчально-науковий інститут

«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

kovrovaviktoriiia@gmail.com, ORCID: 0009-0001-7733-7395

вул. Архітектора Олега Петрова, 24А, Дніпро, 49000, Україна

Анотація. У сучасних умовах будівництво багатоповерхових будинків стає все більш актуальним, що призводить до збільшення щільності забудови та розвитку транспортної інфраструктури. Останнім часом неухильно зростають обсяги будівництва в зонах, що піддаються вібраціям різного характеру. Постійний вплив вібрацій, спричинених зовнішніми чинниками, такими як транспортні потоки або промислові установки, на будівлі може викликати значні зміщення конструктивних елементів і підвищувати рівень шуму, що є додатковим негативним впливом на безпечне функціонування будівлі. Таким чином, проблема контролю впливу цих вібрацій на надійність і довговічність будівлі стає все більш актуальною.

Зменшення впливу частот на структурні характеристики конструкцій та на нормальне функціонування організму людини впроваджується за допомогою віброізоляції будівель та систем моніторингу стану конструкцій. Однак вплив зміни перерізів конструктивних елементів не досліджено повністю.

Метою даного дослідження є пошук раціональних конструктивних рішень з точки зору матеріаломісткості та експлуатаційної придатності будівлі, що знаходиться під впливом динамічних навантажень.

Для аналізу впливу зміни поперечного перерізу колон було розроблено 3 варіанти поперечного перерізу колон, у яких змінювалися форми та геометричні розміри. Геометричні характеристики перерізів розраховувалися за допомогою програми "Арбат", а модальний аналіз виконувався за допомогою програмного комплексу SCAD.

В результаті розрахунку були отримані графіки кривих взаємодії, обмежують область несучої здатності перерізу під дією зусиль, які можуть бути прикладені до перерізу, що аналізується. Зокрема одержано власні частоти і форми коливань, а також оцінені поперечні перерізи колон за їх площею і моментами інерції. Зміна типу перерізу колон не суттєво вплинула на рівень частот коливань будівлі. Однак вона змінила матеріаломісткість і вагу будівлі на 24%, тобто значення навантажень від власної ваги колон, що передаються на фундамент також знизилися. Зниження навантажень на фундаменти дозволяє суттєво скоротити витрати на їх улаштування. Також було виявлено, що зміна типу перерізу може впливати на зміну напрямку руху форм коливань будівлі.

Результати дослідження демонструють можливість оптимізації конструктивних рішень через зміну геометрії колон, що дозволяє не лише економити ресурси, але й забезпечувати надійну експлуатацію будівель.

Ключові слова: багатоповерхові залізобетонні будівлі, метод скінченних елементів, чисельне моделювання, модальний аналіз, власні частоти, раціональні форми поперечних перерізів, форма коливань.

Стаття надійшла до редакції 5.12.2024

АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК БАЛКИ, ЩО ОПИРАЄТЬСЯ НА ПРУЖНУ ОСНОВУ ВІНКЛЕРА З ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНОЮ НЕОДНОРІДНІСТЮ

¹**Крутий Ю.С.**, д.т.н., професор,
yurii.krutii@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7105-3087

¹**Сур'янінов М.Г.**, д.т.н., професор,
sng@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0003-2592-5221

¹**Перпері А.О.**, к.т.н., доцент,
a.perperi@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7112-6864

¹**Вакуленко В.В.**, аспірант,
91vzv19@gmail.com, ORCID: 0009-0008-4410-7666

¹**Теорло Н.А.**, аспірантка,
nata.teorlo@gmail.com, ORCID: 0009-0003-3013-9468

¹*Одеська державна академія будівництва та архітектури*
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. Робота націлена на подальший розвиток аналітичних методів розрахунку на згин балок, що опираються на неоднорідну суцільну пружну основу Вінклера. У даній роботі розглядається випадок, коли балка знаходиться під впливом параболічно-змінного поперечного навантаження, а неоднорідність пружної основи задається експоненціальною функцією. В явній замкнутій формі виписані фундаментальні функції та частинний розв'язок відповідного диференціального рівняння згину балки. Дані функції є безрозмірними та представляються абсолютно і рівномірно збіжними степеневими рядами. В свою чергу, через вказані функції виражаються формули для параметрів напружено-деформованого стану балки – прогину, кута повороту, згинального моменту та поперечної сили. Невідомі константи інтегрування в цих формулах виражені через початкові параметри, які знаходяться після реалізації заданих граничних умов. Тим самим, розрахунок балки на згин зводиться до процедури чисельної реалізації явних аналітичних формул для параметрів напружено-деформованого стану.

На прикладі продемонстровано практичне застосування отриманих розв'язків. Розглянуто призматичну бетонну балку, що опирається на експоненціально-змінну пружну основу. Результати розрахунку авторським методом представлені в чисельному та графічному форматах для випадку, коли обидва кінці балки закріплені. Отримані авторським методом чисельні значення трактуються як точні, оскільки застосований метод розрахунку ґрунтується на точному розв'язку відповідного диференціального рівняння. Наявність таких розв'язків дозволяє шляхом порівняння оцінювати точність розв'язків, отриманих за допомогою різного роду наближених методів. З метою такого порівняння, в роботі надано результати розрахунку, що отримані методом скінченних елементів (МСЕ). Визначено абсолютну похибку МСЕ при розрахунку даної конструкції.

Ключові слова: балка, неоднорідна пружна основа, експоненціальна неоднорідність, гіпотеза Вінклера, точний розв'язок, аналітичний розрахунок.

Вступ. Конструкція, що являє собою балку на пружній основі, часто застосовується в інженерній практиці, в тому числі, в промисловому та цивільному будівництві, в залізничній галузі, гідротехніці, кораблебудуванні, аерокосмічній техніці та інших.

З числа існуючих моделей пружної основи широкого поширення набула так звана модель Вінклера. У цій моделі пружна основа, на яку опирається конструкція, представляється у вигляді набору вертикальних, близько розташованих, не пов'язаних між собою пружин. Таку ситуацію загалом можна описати єдиним параметром, який називають

модулем пружності основи чи коефіцієнтом постелі. У найпростішому випадку, коли пружна основа вважається однорідною, коефіцієнт постелі є сталим, що суттєво спрощує розв'язання відповідного диференціального рівняння згину балки. Цим можна пояснити широко вживане припущення про однорідність основи. Однак загальновідомо, що таке припущення далеке від реальності і для більш якісних досліджень необхідно враховувати неоднорідність (змінність) основи [1]. В такому випадку коефіцієнт постелі буде змінним уздовж осі балки, що суттєво ускладнює розв'язання відповідного диференціального рівняння. Тому в подібних ситуаціях для розв'язання задачі часто застосовують різного роду наближені методи.

Дана робота присвячена аналітичному розрахунку балки на згин у випадку, коли неоднорідність пружної основи описується експоненціальною функцією.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Попри велику кількість публікацій, присвячених розрахунку балок на пружній основі, тільки невелика кількість з них присвячена випадку змінного коефіцієнту постелі. Вперше такий випадок було представлено в монографії [2]. Автор монографії розглянув однорідну балку на пружній основі з лінійно-змінним коефіцієнтом постелі та отримав відповідний розв'язок, спираючись на теорію рядів Тейлора. У статті [3] розглянуто випадок, коли коефіцієнт постелі є степеневою функцією координати. Однак аналітичний розв'язок отримано тільки для випадку, коли степінь дорівнює 1. Для інших позитивних значень степеня розроблено чисельну методику розв'язання. Авторами [4] запропоновано аналітичний метод розрахунку балок на неоднорідних ґрунтах, що супроводжується відповідною чисельною схемою. В якості інструментарію досліджень тут залучено теорію функцій Гріна, що дозволило звести вихідну задачу до системи інтегральних рівнянь. Після дискретизації, дані рівняння розв'язуються чисельно за квадратурною схемою Гаусса-Лежандра. В роботі [5] розглядається випадок лінійно-змінного коефіцієнта постелі. Аналітичний розв'язок відповідного диференціального рівняння згину балки тут отримано в явній замкнутій формі в термінах узагальнених гіпергеометричних функцій. Публікацію [6] присвячено тонким балкам на неоднорідній основі Вінклера. Для розв'язку відповідного диференціального рівняння тут застосовується метод скінченних різниць. Автори [7] за допомогою методу гомотопічного аналізу отримали нові аналітичні розв'язки для статичного прогину анізотропних композитних балок, що спираються на пружну основу змінної жорсткості. Зокрема, розглянуто випадок, коли коефіцієнт постелі змінюється за лінійним законом.

Детальний огляд робіт про згин балок, що опираються на пружну основу Вінклера, надано в публікаціях [8, 9]. Автори [8] після відповідного аналізу констатують, що в науковій періодиці відсутні роботи, які стосуються аналітичних розв'язків задачі про згин балки, коли коефіцієнт постелі є змінним, окрім випадків, коли він задається лінійною функцією. В цій же роботі знайдено аналітичний розв'язок для окремого випадку, коли коефіцієнт постелі змінюється за біноміальним законом з показником степеня – 4. В цілому, після огляду низки публікацій, автори [9] приходять до висновку, що у випадку змінного коефіцієнту постелі дослідники найчастіше застосовують МСЕ.

Отже, розробка аналітичних методів розрахунку балок, що опираються на неоднорідну пружну основу, є актуальною науковою проблемою. Вирішенню даної проблеми присвячено низку публікацій [10-12]. Зокрема, в роботі [10] розроблено аналітичний метод розрахунку балок, що опираються на суцільну пружну основу Вінклера, коли погонний коефіцієнт постелі $k(x)$ та навантаження $q(x)$ задаються довільними неперервними функціями, а згинальна жорсткість EI вважається сталою. Метод ґрунтується на точному розв'язку відповідного диференціального рівняння згину балки:

$$EI y''''(x) + k(x)y(x) = q(x). \quad (1)$$

Спираючись на результати [10], в роботах [11, 12] розглянуто два конкретні випадки для змінного коефіцієнту постелі. Так в публікації [11] неоднорідність пружної основи задається степеневою функцією з довільним невід'ємним показником степеня. При цьому поперечне навантаження на балку вважається сталим. В якості прикладу розглянуто балку, що опирається на кубічно-змінну пружну основу. В статті [12] коефіцієнт постелі змінюється за параболічним законом, а діюче на балку змінне навантаження задано лінійним законом.

Результати розрахунків в обох випадках представлені в чисельному та графічному форматах. Для порівняння, надані також результати розрахунків, що отримані МСЕ. Визначено похибку МСЕ при розрахунках даних конструкцій.

Дану роботу автори позиціонують як черговий крок на шляху розвитку аналітичних методів розрахунку. Вона є логічним продовження досліджень, започаткованих в статтях [10-12].

Мета та завдання. Мета дослідження – подальший розвиток аналітичних методів розрахунку балок, що опираються на неоднорідну суцільну пружну основу Вінклера.

Завдання дослідження:

- виконати аналітичний розрахунок реальної балочної конструкції, що опирається на неоднорідну експоненціально-змінну пружну основу, авторським методом (АМ) та МСЕ;
- визначити похибку МСЕ при розрахунку даної конструкції.

Матеріали та методика дослідження. Для досліджень тут застосовується раніше розроблений в [10] АМ розрахунку. При розробці АМ суттєвим чином використовувались теорія функціональних рядів та теорія звичайних диференціальних рівнянь. АМ ґрунтується на точному розв’язку диференціального рівняння згину балки в узагальненому випадку неперервно-змінних коефіцієнтів. В свою чергу, точний розв’язок знайдено методом прямого інтегрування, який розвинуто в роботах [13-15].

Результати досліджень. Об’єктом дослідження є балка сталої згинальної жорсткості EI , що опирається на неоднорідну суцільну пружну основу Вінклера та знаходиться під впливом змінного неперервно-розподіленого поперечного навантаження (рис. 1).

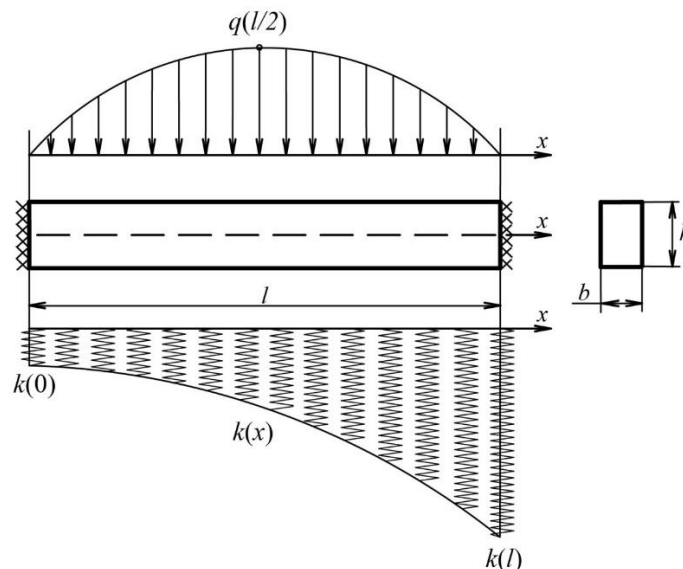


Рис. 1. Розрахункова схема балки

Коефіцієнт постелі змінюється за експоненціальним законом:

$$k(x) = k(0) \exp\left(\delta \frac{x}{l}\right), \quad \delta = \ln \frac{k(l)}{k(0)}, \quad (2)$$

а діюче на балку навантаження вважається параболічно-змінним:

$$q(x) = 4q(l/2) \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right), \quad q(l/2) \neq 0. \quad (3)$$

В роботі [10] для коефіцієнта постелі $k(x)$ та навантаження $q(x)$ прийняті подання:

$$k(x) = k_0 B(x); \quad q(x) = q_0 C(x), \quad (4)$$

де k_0, q_0 – відповідно значення погонного коефіцієнту постелі та навантаження у певній характерній точці балки; $B(x), C(x)$ – безрозмірні неперервні функції, які виражають закони зміни погонного коефіцієнту постелі та розподіленого навантаження уздовж довжини балки.

Отже, безпосередньо з формул (2)-(4), для випадку що розглядається матимемо:

$$k_0 = k(0), \quad B(x) = \exp\left(\delta \frac{x}{l}\right), \quad q_0 = 4q(l/2), \quad C(x) = \frac{x}{l} - \left(\frac{x}{l}\right)^2. \quad (5)$$

Для дослідження згину балки в [10] отримані наступні формули для прогину $y(x)$, кута повороту $\varphi(x)$, згинального моменту $M(x)$ та поперечної сили $Q(x)$:

$$y(x) = y(0)X_1(x) + \varphi(0)lX_2(x) - M(0)\frac{l^2}{EI}X_3(x) - Q(0)\frac{l^3}{EI}X_4(x) + \frac{q_0l^4}{EI}X_5(x); \quad (6)$$

$$\varphi(x) = y(0)\frac{1}{l}\tilde{X}_1(x) + \varphi(0)\tilde{X}_2(x) - M(0)\frac{l}{EI}\tilde{X}_3(x) - Q(0)\frac{l^2}{EI}\tilde{X}_4(x) + \frac{q_0l^3}{EI}\tilde{X}_5(x); \quad (7)$$

$$M(x) = -y(0)\frac{EI}{l^2}\hat{X}_1(x) - \varphi(0)\frac{EI}{l}\hat{X}_2(x) + M(0)\hat{X}_3(x) + Q(0)l\hat{X}_4(x) - q_0l^2\hat{X}_5(x); \quad (8)$$

$$Q(x) = -y(0)\frac{EI}{l^3}\hat{X}_1(x) - \varphi(0)\frac{EI}{l^2}\hat{X}_2(x) + M(0)\frac{1}{l}\hat{X}_3(x) + Q(0)\hat{X}_4(x) - q_0l\hat{X}_5(x). \quad (9)$$

Із формул (6)-(9) видно, що визначення переміщень $y(x)$, $\varphi(x)$ та внутрішніх зусиль $M(x)$, $Q(x)$ в балці зводиться до обчислення значень функцій $X_n(x)$ ($n=1,2,3,4,5$) та їх безрозмірних похідних $\tilde{X}_n(x)$, $\hat{X}_n(x)$, $\hat{X}_n(x)$ ($n=1,2,3,4,5$). Тому доцільно виписати для них кінцеві розрахункові формули. Згідно з результатами роботи [10], матимемо:

$$X_n(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n-1} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k c_{n,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j} \quad (n=1,2,3,4,5). \quad (10)$$

$$\tilde{X}_1(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \tilde{c}_{1,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j-1}; \quad \tilde{X}_n(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n-2} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \tilde{c}_{n,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j} \quad (n=2,3,4,5); \quad (11)$$

$$\hat{X}_1(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \hat{c}_{1,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j-2}; \quad \hat{X}_2(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \hat{c}_{2,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j-1}; \quad (12)$$

$$\hat{X}_n(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n-3} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \hat{c}_{n,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j} \quad (n=3,4,5); \quad (13)$$

$$\hat{X}_1(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \hat{c}_{1,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j-3}; \quad \hat{X}_2(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \hat{c}_{2,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j-2}; \quad (14)$$

$$\hat{X}_3(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \hat{c}_{3,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j-1}; \quad \hat{X}_n(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n-4} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \hat{c}_{n,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j} \quad (n=4,5); \quad (15)$$

$$K = \frac{k_0l^4}{EI}.$$

Коефіцієнти рядів (10)-(15) тут послідовно обчислюються за формулами:

$$c_{n,0,0} = \frac{1}{(n-1)!}; \quad c_{n,0,j} = 0 \quad (n=1,2,3,4) \quad (j=1,2,3,\dots); \quad (16)$$

$$c_{5,0,j} = \frac{C_j}{(j+1)(j+2)(j+3)(j+4)} \quad (j=0,1,2,\dots); \quad (17)$$

$$c_{n,k,j} = \frac{1}{P_{n,k,j}} \sum_{i=0}^j B_{j-i} c_{n,k-1,i} \quad (n=1,2,3,4,5) \quad (k=1,2,3,\dots) \quad (j=0,1,2,\dots); \quad (18)$$

$$P_{n,k,j} = (n+4k+j-4)(n+4k+j-3)(n+4k+j-2)(n+4k+j-1); \quad (19)$$

$$\tilde{c}_{n,0,0} = n-1 \quad (n=1,2); \quad \tilde{c}_{n,0,0} = \frac{1}{(n-2)!} \quad (n=3,4); \quad \tilde{c}_{n,0,j} = 0 \quad (n=1,2,3,4) \quad (j=1,2,3,\dots); \quad (20)$$

$$\tilde{c}_{5,0,j} = \frac{C_j}{(j+1)(j+2)(j+3)} \quad (j=0,1,2,\dots); \quad (21)$$

$$\tilde{c}_{n,k,j} = c_{n,k,j}(n+4k+j-1) \quad (n=1,2,3,4,5)(k=1,2,3,\dots)(j=0,1,2,\dots); \quad (22)$$

$$\hat{c}_{n,0,0} = 0 \quad (n=1,2); \quad \hat{c}_{n,0,0} = 1 \quad (n=3,4); \quad \hat{c}_{n,0,j} = 0 \quad (n=1,2,3,4)(j=1,2,3,\dots); \quad (23)$$

$$\hat{c}_{5,0,j} = \frac{C_j}{(j+1)(j+2)} \quad (j=0,1,2,\dots); \quad (24)$$

$$\hat{c}_{n,k,j} = \tilde{c}_{n,k,j}(n+4k+j-2) \quad (n=1,2,3,4,5)(k=1,2,3,\dots)(j=0,1,2,\dots); \quad (25)$$

$$\hat{c}_{n,0,0} = 0 \quad (n=1,2,3); \quad \hat{c}_{4,0,0} = 1 \quad \hat{c}_{n,0,j} = 0 \quad (n=1,2,3,4)(j=1,2,3,\dots); \quad (26)$$

$$\hat{c}_{5,0,j} = \frac{C_j}{j+1} \quad (j=0,1,2,\dots); \quad (27)$$

$$\hat{c}_{n,k,j} = \hat{c}_{n,k,j}(n+4k+j-3) \quad (n=1,2,3,4,5)(k=1,2,3,\dots)(j=0,1,2,\dots). \quad (28)$$

В наведених формулах B_j, C_j ($j=0,1,2,\dots$) – це коефіцієнти в рядах Маклорена для безрозмірних функцій $B(x), C(x)$ відповідно, записаних по степеням безрозмірної змінної x/l . У нашому випадку, зважаючи на (5) та скориставшись рядом Маклорена для експоненти:

$$B(x) = 1 + \frac{\delta}{1!} \frac{x}{l} + \frac{\delta^2}{2!} \left(\frac{x}{l}\right)^2 + \frac{\delta^3}{3!} \left(\frac{x}{l}\right)^3 + \dots,$$

знаходимо:

$$B_0 = 1, \quad B_j = \frac{\delta^j}{j!} \quad (j=1,2,3,\dots), \quad C_0 = 0, \quad C_1 = 1, \quad C_2 = -1, \quad C_j = 0 \quad (j=3,4,5,\dots). \quad (29)$$

По суті, формулами (6)-(29) визначено алгоритм аналітичного методу розрахунку заданої балки. Даний алгоритм реалізовано програмно.

Приклад. Проведемо розрахунок призматичної бетонної балки з обома закріпленими кінцями (рис. 1). Такому випадку відповідатимуть граничні умови:

$$y(0) = 0; \quad \varphi(0) = 0; \quad y(l) = 0; \quad \varphi(l) = 0.$$

Отже, два початкові параметри $y(0), \varphi(0)$ відомі. Два інших початкових параметри $M(0), Q(0)$ знайдемо із системи рівнянь, яку отримаємо після реалізації граничних умов на кінці $x=l$, використовуючи формули (6), (7). У підсумку рівності (6)-(9) для заданих граничних умов запишуться у вигляді:

$$y(x) = \frac{q_0 l^4}{E_0 I_0} (\lambda_1 X_3(x) + \lambda_2 X_4(x) + X_5(x)); \quad \varphi(x) = \frac{q_0 l^3}{E_0 I_0} (\lambda_1 \tilde{X}_3(x) + \lambda_2 \tilde{X}_4(x) + \tilde{X}_5(x));$$

$$M(x) = -q_0 l^2 (\lambda_1 \hat{X}_3(x) + \lambda_2 \hat{X}_4(x) + \hat{X}_5(x)); \quad Q(x) = -q_0 l (\lambda_1 \hat{X}_3(x) + \lambda_2 \hat{X}_4(x) + \hat{X}_5(x)),$$

де

$$\lambda_1 = \frac{X_4(l)\tilde{X}_5(l) - \tilde{X}_4(l)X_5(l)}{X_3(l)\tilde{X}_4(l) - \tilde{X}_3(l)X_4(l)}; \quad \lambda_2 = -\frac{X_3(l)\tilde{X}_5(l) - \tilde{X}_3(l)X_5(l)}{X_3(l)\tilde{X}_4(l) - \tilde{X}_3(l)X_4(l)}.$$

Вихідні дані: Довжина балки $l = 5$ м; Ширина підшви балки $b = 0,25$ м; Висота балки $h = 0,6$ м; $E = 1,5 \cdot 10^7$ кПа; $k(0) = 1,5 \cdot 10^3$ кН/м²; $k(l) = 4 \cdot 10^3$ кН/м²; $q(l/2) = 120$ кН/м.

Результати розрахунку АМ в числовому форматі представлено в табл. 1, 2 а в графічному – на рис. 2. Для порівняння в табл. 1, 2 також надані результати розрахунку МСЕ у програмному комплексі ЛІРА.

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	0,000000	0,000000	0,00
0,25	0,081470	0,084000	3,11	0,000622	0,000640	2,89
0,5	0,296432	0,305000	2,89	0,001069	0,001100	2,95
0,75	0,601868	0,620000	3,01	0,001348	0,001388	3,01
1	0,957207	0,986000	3,01	0,001470	0,001516	3,08
1,25	1,325332	1,365000	2,99	0,001453	0,001499	3,16
1,5	1,673448	1,725000	3,08	0,001314	0,001356	3,25
1,75	1,973797	2,035000	3,10	0,001074	0,001110	3,35
2	2,204237	2,273000	3,12	0,000758	0,000785	3,50
2,25	2,348681	2,423000	3,16	0,000391	0,000406	3,84
2,5	2,397403	2,474000	3,19	-0,000003	-0,000001	74,09
2,75	2,347215	2,422000	3,19	-0,000396	-0,000407	2,74
3	2,201512	2,272000	3,20	-0,000763	-0,000786	3,05
3,25	1,970193	2,034000	3,24	-0,001077	-0,001111	3,16
3,5	1,669461	1,724000	3,27	-0,001314	-0,001356	3,22
3,75	1,321492	1,364000	3,22	-0,001451	-0,001498	3,25
4	0,953987	0,985000	3,25	-0,001467	-0,001515	3,26
4,25	0,599596	0,619000	3,24	-0,001343	-0,001387	3,25
4,5	0,295208	0,305000	3,32	-0,001065	-0,001099	3,24
4,75	0,081109	0,084000	3,56	-0,000619	-0,000639	3,22
5	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	-192,021207	-197,525131	2,87	192,841855	197,654053	2,50
0,25	-144,053814	-148,348938	2,98	189,952660	194,806778	2,56
0,5	-97,489679	-100,570374	3,16	181,725534	186,575439	2,67
0,75	-53,581381	-55,458664	3,50	168,814024	173,573822	2,82
1	-13,419455	-14,129933	5,29	151,860637	156,412872	3,00
1,25	22,064640	22,452042	1,76	131,495226	135,700333	3,20
1,5	52,095196	53,474960	2,65	108,333782	112,040428	3,42
1,75	76,048685	78,277122	2,93	82,977687	86,033524	3,68
2	93,450075	96,346413	3,10	56,013531	58,276199	4,04
2,25	103,969167	107,319420	3,22	28,013535	29,361370	4,81
2,5	107,417136	110,980476	3,32	-0,463312	-0,121600	73,75
2,75	103,743437	107,260925	3,39	-28,869345	-29,586151	2,48
3	93,033303	96,238434	3,45	-56,665474	-58,447960	3,15
3,25	75,506041	78,136536	3,48	-83,317520	-86,124107	3,37
3,5	51,514360	53,324486	3,51	-108,291591	-112,031647	3,45
3,75	21,544980	22,317429	3,59	-131,048452	-135,586304	3,46
4	-13,779216	-14,223109	3,22	-151,036865	-156,200714	3,42
4,25	-53,695250	-55,488144	3,34	-167,685912	-173,282410	3,34
4,5	-97,294058	-100,519684	3,32	-180,396329	-186,231567	3,23
4,75	-143,512231	-148,208649	3,27	-188,530931	-194,438690	3,13
5	-191,121250	-197,292023	3,23	-191,404274	-197,281708	3,07

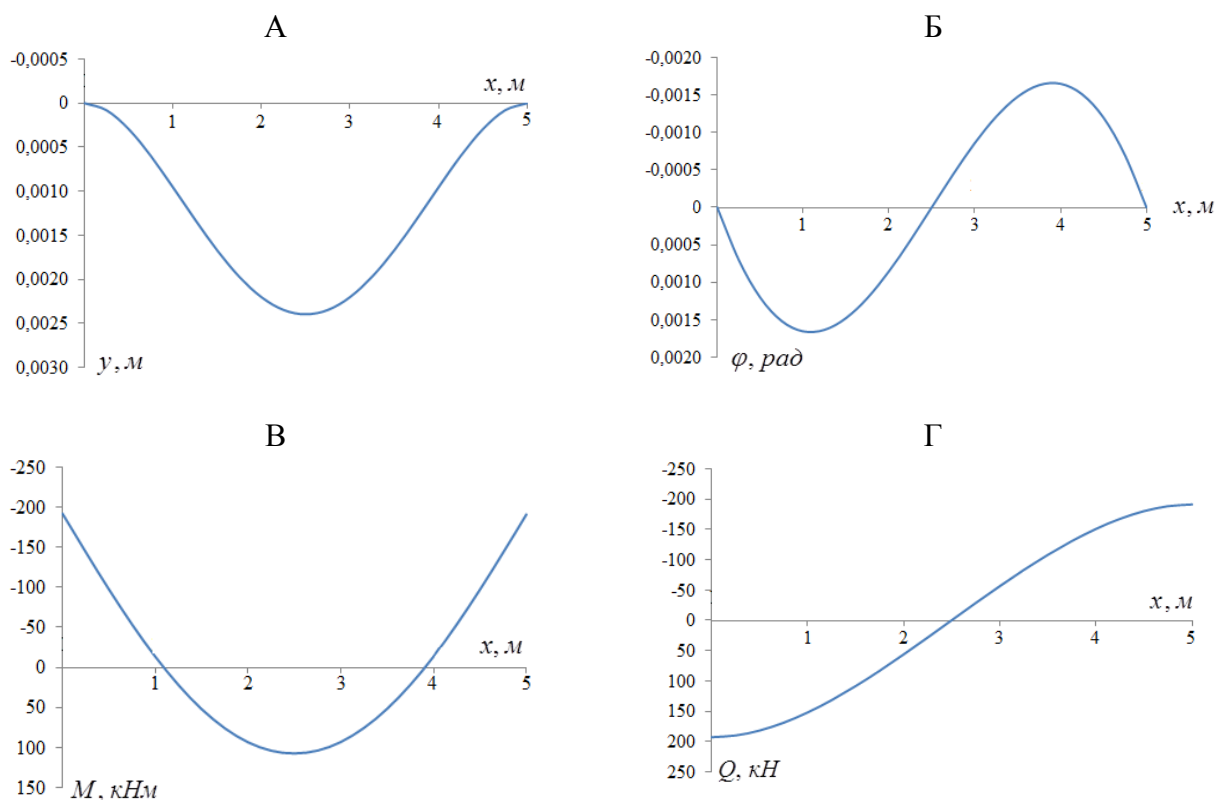


Рис 2. Графіки параметрів стану балки:
 А – прогин; Б – кут повороту; В – згинальний момент; Г – поперечна сила

Слід зазначити, що у програмному комплексі ЛПА не передбачено можливості безпосередньо задати закон зміни коефіцієнту постелі уздовж довжини балки. Для кожного скінченного елемента значення коефіцієнту постелі задається як середнє арифметичне значень на його кінцях, що впливає на величину похибки.

Висновки:

1. За результатами роботи отримали подальший розвиток аналітичні методи розрахунку балок, що опираються на неоднорідну суцільну пружну основу Вінклера. Впровадження таких методів в інженерну практику забезпечить більшу точність розрахунків.

2. До переліку нечисленних поодиноких випадків аналітичних розрахунків балки додано ще один, коли неоднорідність основи описується експоненціальною функцією.

3. Оскільки АМ ґрунтується на точному розв'язку відповідного диференціального рівняння, отримані тут чисельні результати можна трактувати, як точні. Такі розв'язки в замкненій формі є особливо цінними, оскільки вони можуть служити критеріями, по яким можна оцінювати точність різного роду наближених розв'язків.

4. Чисельно визначено похибку розрахунків МСЕ у програмному комплексі ЛПА для конструкції що розглядалася.

5. Перспективи подальших досліджень автори пов'язують з розглядом інших випадків, коли неоднорідність пружної основи Вінклера описується законами зміни коефіцієнта постелі, відсутніми в науковій літературі.

Література

1. Foyouzat M. A., Mofid M., & Akin J. E. On the dynamic response of beams on elastic foundations with variable modulus. *Acta Mechanica*. 2015. 227(2). 549–564. <https://doi.org/10.1007/s00707-015-1485-1>
2. Hayashi K. *Theorie des trägers auf elastischer unterlage: Und ihre anwendung auf den tiefbau, nebst einer tafel der kreisund hyperbelfunktionen*. J. Springer. 1921.
3. Franklin J. N., & Scott R. F. Beam equation with variable foundation coefficient. *Journal of the Engineering Mechanics Division* 1979. 105(5). 811–827. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0002525>
4. Guo Y.-J., & Weitsman Y.J. Solution method for beams on nonuniform elastic foundations. *Journal of Engineering Mechanics*. 2002. 128(5). 592–594. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2002\)128:5\(592\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:5(592))
5. Froio D., & Rizzi E. Analytical solution for the elastic bending of beams lying on a linearly variable Winkler support. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017. 128-129, 680–694. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.04.021>
6. Al-Ani M. Analysis of beams on non-linear elastic Winkler foundation. *Engineering and Technology Journal*. 2005. 24(9), 1251–1261. <https://doi.org/10.30684/etj.24.9A.13>
7. Doeva O., Masjedi P. K., & Weaver P. M. Static analysis of composite beams on variable stiffness elastic foundations by the homotopy analysis method. *Acta Mechanica*. 2021. 232. 4169–4188. <https://doi.org/10.1007/s00707-021-03043-z>
8. Froio D., & Rizzi E. Analytical solution for the elastic bending of beams lying on a variable Winkler support. *Acta Mechanica*. 2015. 227(4). 1157–1179. <https://doi.org/10.1007/s00707-015-1508-y>
9. Al-Azzawi Adel A. & Al-Madani M. H. A state of the art review on beams on non-uniform elastic foundations. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. 13(7). 2647–2660.
10. 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. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012009>
11. Krutii Y., Surianinov M., Perperi A., Vakulenko V., & Teorlo N. Analytical calculation of a beam based on an elastic Winkler foundation with range inhomogeneity. *Mechanics and Mathematical Methods*. 2024. 6(2). 47–57. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-2-47-57>
12. Krutii Y., Surianinov M., Vakulenko V., Soroka M., & Vasilieva N. Analytical calculation of beams on Winkler's variable elastic foundation. *Advances in Science and Technology*. 2024. 156. 75–80. <https://doi.org/10.4028/p-PD9h3g>
13. Крутий 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. 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.
15. Krutii Y., Surianinov M., Karnauhova G. Calculation Method for Axisymmetric Bending of Circular and Annular Plates on a Changeable Elastic Bed. Part 1. Analytical Relations. *Strength of Materials*. 2021. 53(2). 53–62.

References

- [1] M.A. Foyouzat, M. Mofid, & J.E. Akin, "On the dynamic response of beams on elastic foundations with variable modulus", *Acta Mechanica*, 227(2), 549–564, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00707-015-1485-1>
- [2] K. Hayashi, *Theorie des trägers auf elastischer unterlage: Und ihre anwendung auf den tiefbau, nebst einer tafel der kreisund hyperbelfunktionen*, J. Springer, 1921.
- [3] J.N. Franklin, & R.F. Scott, "Beam equation with variable foundation coefficient", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 105(5), 811–827, 1979. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0002525>
- [4] Y.-J. Guo, & Y. J. Weitsman, "Solution method for beams on nonuniform elastic foundations", *Journal of Engineering Mechanics*, 128(5), 592–594, 2002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2002\)128:5\(592\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:5(592))
- [5] D. Froio, & E. Rizzi, "Analytical solution for the elastic bending of beams lying on a linearly variable Winkler support", *International Journal of Mechanical Sciences*, 128-129, 680–694, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.04.021>
- [6] M. Al-Ani, "Analysis of beams on non-linear elastic Winkler foundation", *Engineering and Technology Journal*, 24(9), 1251–1261, 2005. <https://doi.org/10.30684/etj.24.9A.13>
- [7] O. Doeva, P.K. Masjedi, & P.M. Weaver, "Static analysis of composite beams on variable stiffness elastic foundations by the homotopy analysis method", *Acta Mechanica*, 232, 4169–4188, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00707-021-03043-z>
- [8] D. Froio, & E. Rizzi, "Analytical solution for the elastic bending of beams lying on a variable Winkler support", *Acta Mechanica*, 227(4), 1157–1179, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00707-015-1508-y>
- [9] A. Al-Azzawi Adel, & M.H. Al-Madani, "A state of the art review on beams on non-uniform elastic foundations", *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(7), 2647–2660, 2018.
- [10] 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. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012009>
- [11] Y. Krutii, M. Surianinov, A. Perperi, V. Vakulenko, & N. Teorlo, "Analytical calculation of a beam based on an elastic Winkler foundation with range inhomogeneity", *Mechanics and Mathematical Methods*, 6(2), 47–57, 2024. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-2-47-57>
- [12] Y. Krutii, M. Surianinov, V. Vakulenko, M. Soroka, & N. Vasilieva, "Analytical calculation of beams on Winkler's variable elastic foundation", *Advances in Science and Technology*, 156, 75–80, 2024. <https://doi.org/10.4028/p-PD9h3g>
- [13] Yu.S. Krutii, Rozrobka metodu rozviazannia zadach stiikosti i kolyvan deformivnykh system zi zminnyy neperervnyy parametry : dys. d-ra tekhn. nauk : 01.02.04. Lutsk, 2016.
- [14] Y. 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.
- [15] Y. Krutii, M. Surianinov, G. Karnauhova, "Calculation Method for Axisymmetric Bending of Circular and Annular Plates on a Changeable Elastic Bed. Part 1. Analytical Relations", *Strength of Materials*, 53(2), 53–62, 2021.

ANALYTICAL CALCULATION OF A BEAM BASED ON AN ELASTIC WINKLER FOUNDATION WITH EXPONENTIAL INHOMOGENITY

¹**Krutii Yu.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
yurii.krutii@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7105-3087
¹**Surianinov M.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
sng@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0003-2592-5221
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**Teorlo N.**, graduate student,
nata.teorlo@gmail.com, ORCID: 0009-0003-3013-9468
¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
4, Didrihsona str., Odesa, Ukraine, 65029

Abstract. The article is devoted to the analytical calculations for beam bending based on nonhomogeneous solid elastic Winkler base. In this paper we consider the case where the beam is subjected to a parabolic-variable transverse load and the inhomogeneity of the elastic foundation is given by an exponential function. The fundamental functions and partial solution of the corresponding differential equation of beam bending are written out in explicit closed form. These functions are dimensionless and are represented by absolutely and uniformly convergent power series. In turn, these functions are used to express the formulas for the parameters of the stress-strain state of a beam such as deflection, angle of rotation, bending moment, and shear force. The unknown integration constants in these formulas are expressed through the initial parameters, which are found after the implementation of the given boundary conditions. Thus, the calculation of a bending beam is reduced to the procedure of numerical implementation of explicit analytical formulas for the parameters of the stress-strain state.

The practical application of the obtained solutions is demonstrated by an example. A prismatic concrete beam based on an exponentially variable elastic foundation is considered. The results of the author's calculation are presented in numerical and graphical formats for the case when both ends of the beam are fixed. The numerical values obtained by the author's method are interpreted as exact values, since the applied calculation method is based on the exact solution of the corresponding differential equation. The availability of such solutions makes it possible to evaluate the accuracy of solutions obtained using various approximate methods by comparison. To such comparison, the paper presents the results of the calculation obtained by the finite element method (FEM). The absolute error of the FEM in the calculation of this structure is determined.

Keywords: beam, nonhomogeneous elastic foundation, exponential inhomogeneity, Winkler hypothesis, exact solution, analytical calculation.

Стаття надійшла до редакції 2.12.2024

RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE REQUIREMENTS OF REGULATORY DOCUMENTS FOR SEISMIC RESISTANT CONSTRUCTION OF MASONRY BUILDINGS

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

¹**Voloshchuk V.V.**, graduate student, vadims9292@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6259-7090

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

Abstract. The article presents the results of a retrospective analysis of the building codes for the design of masonry buildings in seismic areas. The main attention is paid to the regulatory documents that were developed from the 1930s. The main regulatory documents that were introduced in Soviet times and their improvement are considered. The approval of regulatory requirements for seismic resistance in Ukraine, the introduction of seismic zoning maps depending on the place of construction. The main part of the paper contains a table comparing the main parameters, criteria and requirements of regulatory documents for the design of masonry buildings in seismic areas. The table can be used to track trends in the increase of requirements for seismic-resistant construction both by certain criteria (checking the strength of off-center compression, opening width, the ratio of the width of the partition to the width of the opening, etc. Based on the results of the assessment, the paper describes the possible use of retrospective analysis in the visual assessment of the seismic resistance of masonry buildings.

The systematisation of building codes performed in the paper makes it possible to: first, to trace trends in the development of regulatory documents; second, to identify elements that are obviously deficient in seismic resistance; third, to emphasise the list of issues that should be given priority attention during certification.

Thus, the year of construction, when compared with the regulatory documents which were valid at the time of construction, makes it possible to make a conclusion about the degree of initial prerequisites and solutions made in the project. The practical interest of this table is that when collecting information as part of the assessment process, based on the date of construction of the building, it is possible to conclude which clauses of the applicable regulatory documents the facility potentially does not comply with.

Keywords: seismic resistance, assessment system, retrospective analysis, regulatory framework.

Introduction. Today, in seismic areas of many countries, an important task is to assess the seismic resistance of buildings. The seismic resistance of buildings is assessed by applying a comprehensive seismic resistance assessment system. The first stage of this system is visual assessment, which includes a set of procedures for certification, visual assessment and seismic monitoring. To date, such a system has already been developed for buildings with a monolithic reinforced concrete frame, and development is ongoing using the existing methodology for other structural schemes of buildings. [1-3]. For this purpose, a comprehensive analysis of the regulatory framework for construction in seismic areas was conducted.

Analysis of recent research and publications. During the twentieth and twenty-first centuries, requirements for the seismic resistance of masonry buildings in the territory of modern Ukraine were developed. The development of the regulatory framework for ensuring earthquake resistance in Ukraine dates back to Soviet times, when the territory of modern Ukraine was part of

the USSR. During this period, the basis for regulating earthquake-resistant construction was the all-Union norms that took into account the experience of construction in various seismically active regions of the USSR, such as the Caucasus, Central Asia and the Far East. The development of the regulatory framework for earthquake-resistant construction was aimed at addressing the challenges of earthquake protection in various regions, including those that are now part of Ukraine. In the 1930s, the Soviet Union began to formulate the first rules for anti-seismic construction, according to which the intensity was 5-8 points, attention was paid to the symmetry of buildings to avoid uneven distribution of loads, and the use of rigid horizontal and vertical elms in structures was mandatory, but the first recommendations included simplified approaches to calculating seismic impacts due to the lack of advanced computing technology. In the 1950s, regulatory documents appeared, namely PSP-101-51 "Regulations for Construction in Seismic Areas" and design guidelines SN 8-57. "Norms and Rules for Construction in Seismic Areas" of earthquake-resistant structures. Their creation was caused by significant earthquakes in the USSR, in particular in Turkmenistan (Ashgabat, 1948), which had catastrophic consequences. These documents focused on the choice of materials, design schemes and construction technology. Requirements were developed for the rigidity of buildings and their ability to withstand horizontal loads during earthquakes [4-8].

The adoption of SNiP II-7-81 "Construction in Seismic Areas" [9] not only improved the methodology of calculations for seismic impacts, but this document also took into account international experience and research results in Soviet research institutes.

After gaining independence in 1991, Ukraine began to adapt the Soviet regulatory framework to national conditions, taking into account local geological features. In the current DBN B 1.1-12:2006 [10] and DBN B1.1-12 2014 [11], the intensity of seismic impacts, in terms of microseismic scale points, for the construction area should be taken on the basis of the General Seismic Zoning Maps (GZM-2004) of the territory of Ukraine.

In addition to the introduction of seismic zoning maps, the requirements for materials, structures and construction technology have become more stringent. This document has significantly changed the situation with seismic risk assessment, as the intensity has been increased by at least 1 point for a significant part of the territory of our country. Changing requirements for buildings and increased seismic hazard have led to the fact that a large number of buildings need to have their seismic resistance assessed.

Table 1 provides a comparative analysis of the requirements of regulatory documents for the design of masonry buildings. Presentation in the form of a table makes it possible to follow the trends in the change and development of regulatory documents, identify the most vulnerable parts and elements that have insufficient seismic resistance, and indicate issues that should be given more attention.

The purpose of the study. To perform a generalized retrospective analysis of the requirements of regulatory documents regarding the seismic resistance of masonry buildings.

Materials and methods of the study. In this paper, we analyzed the project documentation on the start of implementation and changes in the requirements for ensuring the seismic resistance of masonry buildings. In particular, a retrospective analysis was performed for buildings with a frame structural scheme [12-14]. Also, the American FEMA 154 indicates the year that shows changes in the regulatory framework of requirements and norms, so it is possible to track the trend of improving these norms and introducing more stringent requirements for the seismic resistance of buildings [15].

BUILDING STRUCTURES

Table 1 – Comparative table of requirements for the design of masonry buildings

Criterion		SNiP II-12-62	SNiP II-12-69	SNiP II-7-81	DBN 2006	DBN 2014
1. Brick grade for masonry is not lower than		M75	M75	M75	M75	M75
2. The grade of mortar for masonry is not lower than		M25	M25/50	M25/50	M50	M50
3. Concrete stones, solid and hollow, with a total density of not less than		---		1200 kg/m ³	1200 kg/m ³	800 kg/m ³
4. Axial stretching Rp	1 category	Rp≥1.8 kg/cm ²	Rp≥1.8 kg/cm ²	Rp≥1.8 kg/cm ²	Rp≥1.2 kg/cm ²	---
	2 category	1.8 kg/cm ² >Rp>1.2 kg/cm ²	1.8 kg/cm ² >Rp>1.2 kg/cm ²	1.8 kg/cm ² >Rp>1.2 kg/cm ²		
	3rd category	1.2 kg/cm ² >Rp>0.6 kg/cm ²	1.2 kg/cm ² >Rp>0.6 kg/cm ²	---		
	4th category	0.6 kg/cm ² >Rp>0.3 kg/cm ²	---			
5. Emptiness		---			up to 20%	up to 35%
6. Off-center compression strength test		---			+	+
7. An anti-seismic belt (with a supporting section of the floor) should be arranged, as a rule, for the entire width of the wall; in external walls with a thickness of 500 mm or more, the width of the belt may be 100-150 mm less. The height of the belt should be at least 150 mm, and the concrete grade I should be at least 150. Anti-seismic belts should have longitudinal reinforcement of 4d10 for a design seismicity of 7-8 points and not less than 4 d12 for 9 points.		+				
8. Stairwells on two sides of the building for 9 points		---	+			
9. The value of vertical seismic load for the calculated seismicity should be taken as	7-8 points		15%		---	
	9 points	---	30%			
10. Beam lintels shall be embedded in the masonry walls by 30-35 cm. Lintels with a span of up to 1.5 m are allowed to be embedded by 25 cm.		+				
11. The removal of balconies at the calculated seismicity should not exceed	7 points	1.5 m			1.5 m	
	8 points	1.25 m				
	9 points	1.0 m	1.25 m			

Criterion			SNiP II-12-62	SNiP II-12-69	SNiP II-7-81	DBN 2006	DBN 2014
12. The height of the floor of buildings with load-bearing stone walls should not exceed in areas with seismicity (in case of reinforcement of masonry with reinforced concrete inclusions, another height is allowed)	7 points	1 category	8 m	6 m		5 m (6 m)	
		2 category	7 m				
		3rd category	6 m				
		4th category	5 m				
	8 points	1 category	7 m	5 m		4 m (5 m)	
		2 category	6 m				
		3rd category	5 m				
		4th category	---				
	9 points	1 category	6 m	4 m		3.5 m (4.5 m)	3.2 m (4.2 m)
		2 category	5 m				
		3rd category	---				
		4th category	---				
13. The distance between the axes of transverse walls or frames that replace them is not more than	6 points		---				20 m
	7 points	1 category	25 m	18 m		15 m	
		2 category	20 m	15 m			
		3rd category	16 m	12 m	---		
		4th category	10 m	---	---		
	8 points	1 category	20 m	15 m		12 m	
		2 category	16 m	12 m			
		3rd category	12 m	9 m	---		
		4th category	---	---	---		
	9 points	1 category	16 m	12 m		9 m	
		2 category	12 m	9 m			
		3rd category	---				
4th category		---					
14. The length of the sections should not exceed the standard seismicity	7 points	1 category	As for non-seismic areas	---	80 m	80 m	
		2 category					
		3-4 categories					---
	8 points	1 category	As for non-seismic areas	80 m	80 m		
		2 category		70 m			
		3rd category		60 m			
		4th category		---			
	9 points	1 category	No more than 60m	60 m	60 m	60 m	
		2 category	No more than 40m	40 m			
		3rd category	-//-	---			
		4th category	-//-				

Criterion		SNiP II-12-62	SNiP II-12-69	SNiP II-7-81	DBN 2006	DBN 2014		
15. Connecting walls in masonry		The masonry infill should be connected to the frame by reinforcement laid in horizontal joints in each direction from the post at least 70 cm.	In the wall joints, reinforcing mesh 1.5-2 m long should be laid in the masonry every 70 cm in height at a design seismicity of 7-8 points and every 50 cm at 9 points.	Reinforcing mesh with a total cross-sectional area of longitudinal reinforcement of at least 1 cm ² , at least 120 cm long in each direction, should be placed in the masonry at wall joints every 70 cm in height at seismicity of 7 and 8 points and every 50 cm at 9 points.				
16. The width of the walls should be not less than	6 points	---				0.64 m		
	7 points	1 category	0.64 m				0.77 m	
		2 category	0.77 m					
		3rd category	0.9 m		---			
		4th category	0.9 m	---				
	8 points	1 category	0.9 m			1.16 m		
		2 category	1.16 m					
		3rd category	1.55 m		---			
		4th category	1.55 m	---				
	9 points	1 category	1.16 m			1.55 m		
		2 category	1.55 m					
		3rd category	---					
		4th category	---					
	17. The width of the openings should be not less than	6 points	---				3.5 m	
		7 points	1 category	3.5 m				3 m
			2 category	3.5 m				
3rd category			2.5 m	2.5 m	---			
4th category				---				
8 points		1 category	3 m			2.5 m		
		2 category	3 m					
		3rd category	2 m	2 m	---			
		4th category		---				
9 points		1 category	2.5 m			2 m		
		2 category	2.5 m					
		3rd category	---					
		4th category	---					

Criterion		SNiP II-12-62	SNiP II-12-69	SNiP II-7-81	DBN 2006	DBN 2014
18. The ratio of the width of the partition to the width of the opening should be not less than	6 points	---	---		0.3	
	7 points		0.33		0.35	
	8 points		0.5		0.5	
	9 points		0.75		0.8	
19. Wall projections in the plan are not more than	6 points	---			3.5 m	
	7 points	4 m	2 m			
	8 points	2 m	1 m			
	9 points	1 m	---			
20. The length of the section of resting of floor slabs and coatings on load-bearing structures shall be not less than:		120 mm	120 mm	120 mm	120 mm	120 mm
21. Partitions shall be attached to the vertical structures of buildings, and for lengths over 3 m – to the ceilings.		+	+	+	+	+

Results of the research. Based on this study, before a visual assessment of seismic resistance, based on the date of construction of the facility, it is possible to conclude which clauses of the current regulatory documents the facility does not comply with. In particular, the DBN V.2006 and V.2014, unlike the soviet standards, require that the strength of structures be tested for off-center compression when calculating them. The requirements for supporting beam lintels remain common to all documents. The requirements for the maximum floor height at different intensities are clearly visible, and the same trend is observed in the permissible distance between the axes of transverse walls or frames.

The requirements for the installation of anti-seismic belts, slab abutment areas, beam lintels, requirements for fixing partitions to vertical structures and for floors with a length of more than 3 m remained unchanged.

The systematization of the requirements of the regulatory documents presented in the table makes it possible to:

- first, to trace trends in the development of regulatory documents;
- second, to identify elements that obviously have a deficit in seismic resistance;
- third, to emphasize the list of issues that should be given priority attention during certification.

Thus, the year of construction, when compared with the regulatory documents in force at the time of construction, makes it possible to draw a conclusion about the degree of initial prerequisites and decisions made in the project. The practical interest of this table lies in the fact that when collecting information as part of the certification process, based on the date of construction of the facility, it is possible to conclude which clauses of the applicable regulatory documents the facility potentially does not comply with.

Conclusions.

1. A retrospective review and systematization of regulatory documents on the seismic resistance of masonry buildings has been carried out.

2. The tendency of development and detailing of the required parameters depending on the category, score and dimensions of the structure was noted, the unchanged requirements and the

requirements that were improved were identified.

3. According to the results of this study, when conducting a visual assessment of the seismic resistance of a building, based on the year of construction, it is possible to determine the main criteria to be paid attention to.

Referenses

- [1] A.V. Murashko, K.V. Egupov, D.I. Bezushko, O.V. Adamov, "Struktura ta etapy dynamycheskoi pasportyzatsyy zdaniy", *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, no. 52, pp. 95-99, 2013.
- [2] V.S. Dorofeev, A.V. Murashko, "Kriterii kompleksnoy otsenki seysmostoykosti zdaniy", *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudi*, no. 29, pp. 139-144, 2014.
- [3] V.S. Dorofeev, A.V. Murashko, "Sistema otsenki fakticheskoy seysmostoykosti zdaniy v svete deystvuyushey normativnoy bazyi", *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, no. 56, pp. 245-248, 2015.
- [4] O.I. Valovoi, V.L. Okhrimchuk, "Otsinka tehnichnogo stanu protyazhnykh kam'yanikh budivel v umovakh seysmonebezpechnykh teritoriy", *Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudi*, no. 32, pp. 321-326, 2016.
- [5] 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 June 2006 Including Corregendum No. 1, department of building and housing, 2006.
- [6] NZS 1170.5-2004. Earthquake actions - New Zealand Technical Committee, Standards New Zealand, 2004.
- [7] S. Constantinescu, "Study of Confined Masonry Buildings in Seismic Areas", *Energy Procedia*, no. 112, pp. 545-554, 2017. doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1114.
- [8] P.D. Gkournelos, T.C. Triantafyllou, D.A. Bournas, "Seismic upgrading of existing masonry structures: A state-of-the-art review", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, no. 161, 2022. doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107428
- [9] G. Magenes, "Masonry building design in seismic areas: recent experiences and prospects from a european standpoint", *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, 2006.
- [10] DBN V 1.1-12: 2006. Budivnitstvo v seysmichnykh rayonah Ukrayini. K.: Minbud. Ukrayini, 2006.
- [11] DBN V 1.1-12:2014. Budivnitstvo v seysmichnykh rayonah Ukrayini. K.: Minrehion Ukrayini, 2014.
- [12] A. Murashko, A. Gubanov, K. Kryuchkov, I. Benradi, "Retrospektivnyiy analiz trebovaniy normativnykh dokumentov po seysmostoykomu stroitelstvu karkasnykh zdaniy", *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, no. 65, pp. 42-48, 2016.
- [13] O. 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.
- [14] V. Voloshchuk, O. Murashko, K. Kryuchkov, "Kompleksne urahuvannya vplyvu otvoriv u stinah ta tipu perekrittiv pri vizualnomu otsynuvanni seysmostoykosti budivel z tseglyanogo muruvannya", *Nauka ta budivnitstvo*, no. 38(4), 2024. doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-8
- [15] Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards A Handbook. FEMA 154, Edition 2, March 2002.

**РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ ВИМОГ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ
З СЕЙСМОСТІЙКОГО БУДІВНИЦТВА ДО БУДИНКІВ З КАМ'ЯНОГО
МУРУВАННЯ**

¹Мурашко О.В., д.т.н., доцент,
alexeymurashko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2812-5951
¹Волощук В.В., аспірант,
vadims9292@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6259-7090
¹Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. У статті представлено результати ретроспективного аналізу будівельних норм щодо проектування будівель з кам'яної кладки у сейсмічних районах. Основну увагу приділено нормативним документам, які розроблялися з 1930-х років. Розглянуто основні нормативні документи, які були введені за радянських часів та їх удосконалення. Затвердження нормативних вимог до сейсмостійкості в Україні, введення карт сейсмічного районування в залежності від місця будівництва. Основна частина статті містить таблицю порівняння основних параметрів, критеріїв та вимог нормативних документів до проектування будівель з кам'яного мурування у сейсмічних районах. За допомогою таблиці можна відстежити тенденції підвищення вимог до сейсмостійкого будівництва, як за окремими критеріями (перевірка несучої здатності на позацентровий стиск, ширина прорізу, відношення ширини перегородки до ширини прорізу тощо), так і за всіма іншими (перевірка на несучу здатність на позацентровий стиск, ширина прорізу тощо). За результатами оцінювання в роботі описано можливість використання ретроспективного аналізу при візуальному оціюванні сейсмостійкості кам'яних будівель.

Проведена в роботі систематизація будівельних норм дає можливість: по-перше, простежити тенденції розвитку нормативних документів; по-друге, виявити елементи, які явно не мають достатнього рівня сейсмостійкості; по-третє, виокремити перелік питань, на які слід звернути першочергову увагу під час сертифікації.

Таким чином, рік будівництва, порівняно з нормативними документами, що діяли на момент будівництва, дає можливість зробити висновок про ступінь вихідних передумов і рішень, закладених у проекті. Практичний інтерес цієї таблиці полягає в тому, що при зборі інформації в рамках процесу оцінювання, виходячи з дати будівництва будівлі, можна зробити висновок про те, яким пунктам чинних нормативних документів об'єкт потенційно не відповідає.

Ключові слова: сейсмостійкість, система оцінювання, ретроспективний аналіз, нормативна база.

Стаття надійшла до редакції 6.12.2024

ANALYSIS OF FOREIGN EXPERIENCE IN RESEARCH CASES OF PROGRESSIVE COLLAPSE OF BUILDINGS AND STRUCTURES

¹Fesun I.K., postgraduate student,
fesuni99@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6678-9900
¹Vabishchevich M.O., Doctor of Technical Sciences, Professor,
vabix@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0755-5186
¹Lukashevych D.Y., postgraduate student,
lukashevych_dy-2023@knuba.edu.ua, ORCID: 0009-0001-3555-2353
¹*Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture*
31 Povitryany Sil Ave., Kyiv, 03037, Ukraine

Abstract. One of the leading areas of the engineering scientific community is the research of the performance of structures and systems in general during unlikely (extreme) events, in particular, the progressive collapse of buildings and structures. A large number of cases of collapse of buildings and structures of various purposes and levels of responsibility are known, and researchers in the field of progressive collapse are interested only in cases of the highest level of responsibility because the social, political, and economic impact of the loss of such buildings and structures is the most significant.

The purpose of this paper is to comprehensively analyze the phenomenon of the progressive collapse of buildings and structures based on the experience of significant foreign cases. The analysis includes the causes of progressive collapse initiation, the degree of disproportionality of progressive collapse, types of progressive collapse, and design features of progressive collapse cases.

The study uses an approach that not only includes the results of the analysis of direct cases of progressive collapse, but also provides statistical characteristics depending on the cause of initiation, type of collapse, and geometric location of the initial damage. Particular attention is paid to the compliance of the accepted methods for modeling progressive collapse with real cases of progressive collapse.

The study results showed that the existing estimates of progressive collapse cases take into account the so-called degree of disproportionality of the collapse. This is because it is only possible to guarantee resistance to progressive collapse if the collapse is only disproportionate. The fact that the initial failure of one or more columns occurred in about half of the progressive collapse cases indicates that modeling progressive collapse due to sudden column removal is rational.

Further research can focus on finding real collapse scenarios, in particular, the choice of a column that is suddenly removed from the scheme, studying the correctness of load redistribution when a column is suddenly removed, and studying the resistance to progressive collapse of buildings with structural schemes made of wood or precast concrete.

Keywords: progressive collapse, degree of disproportionality, destruction, column removal, modeling, design features, stability.

Introduction. Social and political challenges, increasing the safety and comfort of people's lives, the introduction of economic technologies, and the modern technological development of computing are the key factors that lead a wide range of scientists and engineers to investigate hitherto unknown phenomena and processes. In structural engineering, one such process is the study of the operation of structures and systems in general during unlikely (extreme) events. Such events cause the destruction of individual small but important structures, which can subsequently spread to the entire system or a significant part of it. This phenomenon is known as the progressive collapse of buildings and structures.

In general, a large number of cases of collapse of buildings and structures of various purposes

and levels of responsibility have been recorded in world history. Researchers in the field of progressive collapse are directly interested in cases of only the highest level of responsibility because the social, political, and economic impact of the loss of such buildings and structures is the most significant. As of the middle of the third decade of the 21st century, more than 40 thoroughly investigated cases of progressive collapse of buildings and structures of the highest level of responsibility have been recorded. These are mainly multi-family housing, business centers, educational institutions, governments, etc.

Analysis of Recent Research and Publications. The first case of progressive collapse, which marked the beginning of the study of this phenomenon, occurred in 1968 in London, Great Britain. A 22-story precast concrete residential building called the Ronan Point partially collapsed after 3 months of operation, Fig. 1. A gas explosion on the 18th floor caused the destruction of the factory-made load-bearing wall panel, which in turn caused the progressive collapse of an entire corner of the building due to the impact load from the floors above [4, 5]. This tragedy led to changes, first of all, in the regulatory frameworks of the United Kingdom – the first recommendations for ensuring stability in case of progressive collapse (for large-panel buildings) were introduced, and later in the United States, Canada, and Europe. These changes were more focused on preventive measures to prevent the occurrence of progressive collapse.

Despite the impulsive start of scientific research in the 1970s after the Ronan Point progressive collapse case, and the emergence of several other global cases, the number of studies gradually decreased until the mid-1990s, when new significant cases of this phenomenon occurred and interest in the topic was renewed [9].

About a third of the Alfred P. Murrah Federal Building in Oklahoma City was destroyed in 1995 as a result of a terrorist attack, Fig. 2. The peculiarity of this case is that the explosion of a truck filled with explosives caused the destruction of at least three columns at once, and the loss of these columns led to the destruction of the key beam on which all the above structures were transferred.



Fig. 1. The collapse of the Ronan Point residential building in London, Great Britain, 1968



Fig. 2. Collapse of the Alfred P. Murrah Federal Building in Oklahoma City, USA, 1995

The collapse of the Sampoong shopping center in Seoul, South Korea, in 1995 was caused by gross errors in design decisions, lack of appropriate control during design and construction, and violations during construction and operation, Fig. 3. The condition of the building before the collapse was accompanied by constantly increasing excessive deflections in the roof and cracking in the columns, a situation that was aggravated by the dynamic impact of air conditioners located on the roof. The process of building collapse was initiated by the destruction of a column on

the 5th floor, which caused the collapse of the roof structures to the lower floor, the load was not withstood by the supporting columns of the lower floors, and the building collapsed completely [6]. Before the September 11, 2001, terrorist attacks, this was the largest building collapse in modern world history in terms of the number of victims.

The collapse of the World Trade Center towers occurred on September 11, 2001, in New York, USA, during the largest terrorist attack in world history, codenamed "911", Fig. 4. An airliner crashed into each of the twin towers at high speed, and the collisions caused serious damage to the towers' structures and fires inside. The destruction of both the south and north towers did not occur instantly, but 56 and 102 minutes after the impacts, respectively. Directly in the impact zones, some of the structures were destroyed immediately, while the remaining structures gradually began to lose their bearing capacity and stability over time due to the combined effects of the fire and additional loads resulting from the redistribution of the load from the destroyed structures. Over time, this course of events resulted in the inability of the load-bearing structures in the collision zone to transfer loads from the floors above. As a result, the upper part of the tower collapsed on the lower floors, which led to the collapse of the lower floors, which spread to the ground [5].



Fig. 3. Collapse of the Sampoong shopping center in Seoul, South Korea, 1995



Fig. 4. Collapse of the WTC towers in New York, USA, 2001

In general, the last cited case of progressive collapse was the starting point for intensifying research into this phenomenon. The twin towers were designed to withstand both airplane impact and fire, but they were not designed for the combined impact that caused the towers to collapse. First of all, in the United States, which is a leader in this field, several scientific studies have been performed and broad recommendations have been issued to ensure resistance to progressive collapse, including options for modeling progressive collapse using numerical methods during design work [9, 12].

A comparative review of the main world cases of progressive collapse (13-14 cases) was made in [3, 7, 9]. Paper [12] defines the state of research on the progressive collapse of building structures in the 21st century.

The purpose of this paper is to comprehensively analyze the phenomenon of progressive collapse of buildings and structures based on the experience of foreign significant cases. The main objectives of this study are as follows:

- searching for the causes of progressive collapse initiation;
- determination the classification of collapse by the amount of initial damage;
- determination the classification by the type of collapse development;
- determination of the design features of progressive collapse cases;
- determination of compliance of existing modeling methods with real cases of progressive collapse.

Materials and Methods. This paper uses various methods to analyze the foreign experience of researching cases of progressive collapse of buildings and structures. First of all, these are the methods of literature review and comparative analysis.

The following materials were used for this work: scholarly articles, conference proceedings, documents of government organizations, etc.

Research results. *Causes of progressive collapse initiation.* In a general sense, the phenomenon of progressive collapse of buildings and structures is possible due to the occurrence of certain special influences (causes of initiation) that cause the destruction of individual elements of buildings and structures. The following ways of occurrence of this phenomenon are distinguished [3]:

- due to off-design (abnormal) impact on structures;
- due to the effects of structural deficiencies;
- the combined effect of the previous points.

Off-design (abnormal) impacts are the consequences of actions such as fires, terrorist attacks, hostilities, natural disasters, errors during construction, operation, etc. These impacts are unlikely, but they create unforeseen dynamic loads that are often not taken into account in established design practices.

The impact of structural deficiencies includes defects in materials, geometric parameters of structures, and characteristics of the operating conditions of the structure. For example, corrosion of reinforcement in reinforced concrete structures can reduce the bearing capacity, which in turn can lead to the destruction of individual elements even at design loads. Also, errors in the design of structures can lead to an incorrect assessment of the bearing capacity of an element, causing an accident under the design loads.

The study [7] on statistical processing of global cases of progressive collapse found that, as a rule, there were several causes of initiation at the same time, i.e., the so-called combined combination of causes. Among the 41 analyzed cases, the following causes were identified, which acted as a separate cause (mainly explosive and impact), and as part of a combination:

- errors during design – 15/41;
- errors during construction – 12/41;
- terrorist acts – 6/41;
- fires – 3/41;
- degradation of materials – 2/41;
- change of use of the facility – 2/41;
- accidental explosion – 1/41.

Thus, the prevention of progressive collapse is to some extent characterized by the strength of individual structural elements of buildings and structures. However, the vast majority of structural schemes are inseparable schemes that take into account the overall interaction of structural elements, ensuring the joint operation of the entire system [3].

The degree of disproportionality of the progressive collapse. The interpretation of the phenomenon of progressive collapse is covered in different ways in foreign scientific literature and foreign regulatory documents. For example, the American guidelines [1] state the following: “progressive collapse is defined as an extent of damage or collapse that is disproportionate to the magnitude of the initiating event. Since this definition focuses on the relative consequence or magnitude of the collapse rather than the manner in which it occurs, it is often referred to in the industry as "disproportionate" rather than "progressive" collapse". At the same time, some studies indicate the correctness of using the term "progressive collapse" instead of "disproportionate collapse" [5].

Comparing the cases of the Ronan Point and the Alfred P. Murrah Federal Building, it can be established that they both meet the term progressive collapse defined above, but if we consider them in terms of disproportionality, differences arise [5]. The magnitude of the collapse of the federal building was significant, but the cause of the collapse – a truck bomb – was also significant, and the number of structures destroyed by the explosion (not by subsequent collapse) was not single, unlike the collapse of the residential building.

Similarly, the case of the World Trade Center towers can be cited, where these cases are also classified as progressive collapse, but they should not be defined as disproportionate, since the magnitude of the initiating impact – the collision of an airliner – was significant. Although the initial recommendations for ensuring resistance to progressive collapse were implemented, namely, the redundancy of the bearing capacity of the frame columns was ensured (according to the conclusions of some researchers, the redundancy was so great, in particular, of the extreme frame structures), but the combined impact of the impact and fire was so large that the redundancy did not change the result in general [5]. However, it must be admitted that this allowed precious time to evacuate people below the collision zone before the final collapse of the towers. The conclusion that none of the measures adopted to prevent disproportionate progressive collapse would have been useful for the World Trade Center towers supports the idea that the collapse of these buildings was not disproportionate to begin with [5].

In view of the above, the scientific community is divided on the definition of disproportionality:

- 1) determination in terms of the ratio of the cause of the collapse initiation to the amount of final damage [1];
- 2) determination in terms of the ratio of the initial damage to the final damage [3].

However, the question arises as to the appropriateness of using the word "progressive", since any destruction/collapse is a process that occurs (is observed) in time, i.e. all possible destructions can be considered progressive. Therefore, it can be assumed that a non-progressive collapse cannot exist [8].

Thus, existing assessments of progressive collapse cases take into account the so-called degree of disproportionality of collapse (separation of the characteristics of the cause of initiation, the magnitude of the initial damage, and the magnitude of the final damage) [3]. This is because it is only possible to guarantee resistance to progressive collapse if the collapse is disproportionate.

One of the tasks in terms of ensuring the reliability of construction facilities should not be to prevent progressive collapse in general, but to prevent disproportionate progressive collapse. In the event of failure to prevent progressive collapse, the priority is to ensure that the collapse of the building is delayed.

Types of progressive collapse. After the noted cases of progressive collapse, U. Starosek proposed a classification of types of progressive collapse [10, 11]. Each type of progressive collapse characterizes the mechanics of collapse development in structures. The main types are as follows:

- pancake type;
- domino type;
- zipper type;
- section type;
- instability type;
- mixed type.

The pancake and domino types can be grouped into a separate super category of impact collapses, since they are caused by the sudden dissipation of the potential energy of the collapsed elements into kinetic energy. The zipper type and the sectional type can be classified as a separate super category of redistributive collapse since they occur as a result of the redistribution of forces from the destroyed structures to other structures [9, 12].

The pancake type of collapse is characterized, first of all, by the initial destruction of the load-bearing structure responsible for the transmission of the vertical load. Further collapse occurs due to the simultaneous destruction of other vertical load-bearing elements that are unable to withstand the increased redistributed load and the impact of higher structures on lower structures. Progressive collapse develops in the vertical direction [3]. An example of such a collapse is the WTC towers.

The domino type of collapse is characterized by the initial overturning of one of the load-bearing elements, which leads to a lateral impact of the overturned element on the side surface of the next element. Thus, horizontal loading through a chain reaction causes a progressive collapse in the direction of overturning. An example of such a collapse is the cascading destruction of power

line towers [13]. The influence of the collapsing element can be indirect, the pushing force can be replaced by a pulling force through the connecting elements [7].

The zipper type of collapse is characterized by the initial destruction of one or more structural elements, which leads to dynamic impulse overloading of other structures due to the redistribution of forces. The development of this type of progressive collapse occurs in the horizontal direction. An example of such a collapse is a sudden break of bridge cables or retaining wall anchors [13]. The section type of collapse is similar to the zipper type. The main difference is replacing the terms cross-section and part of the cross-section with a structural element. It is assumed that the cross-section is amorphous and homogeneous, while other structures may consist of separate elements, each with different characteristics [14].

The type of collapse instability is characterized by the initial destruction of an element that ensures the stability and spatial rigidity of the system as a whole. An example of such a collapse is the destruction of the ligament elements of steel spatial frames, which prevents the frame from being resistant to lateral loads, such as wind.

A mixed type of progressive collapse is a combination of these simple types. The analyzed world cases of progressive collapse show that in real conditions, collapse rarely occurs within one type. As a rule, mixed types prevail. Among the 31 cases analyzed, the pancake type of collapse was recorded in 87% of cases, "lightning" in 45%, and "domino" in 10% [7].

Design features of progressive collapse events. The analyzed world cases of progressive collapse are characterized by the presence of initial failure of one or more structural elements, the failure of which extends to the destruction of the system as a whole or a significant part of it. The localization of the initial failure is reduced to the horizontal and vertical positions. In work [7] on the statistical processing of cases of progressive collapse, it was found that in the plane of the horizontal position, out of 31 analyzed cases, initial failure occurred:

- in the regional zones 6/31 – 19%;
- in the inner zones 14/31 – 45%;
- combined in the regional and inland zones 3/31 – 10%;
- not established 8/31 – 10%.

Already in the plane of the vertical position, out of 31 cases analyzed, the initial destruction occurred [7]:

- roof 8/31 – 26%;
- upper part of the building 8/31 – 26%;
- lower part of the building 4/31 – 13%;
- ground floor 6/31 – 19%;
- basement 1/31 – 3%;
- not installed 4/31 – 13%.

Equally important is the analysis of the structures that led to the progressive collapse. Initial failure occurred in columns, beams, slabs, walls, etc. Among all the cases analyzed, in 45% of the cases, the initial failure of one or more columns led to progressive collapse. In 64% of them, the initial failure occurred simultaneously in two or more columns [7]. Such a distribution confirms the rationality of modeling progressive collapse due to the removal of sudden columns, as recommended by various regulatory documents.

According to research [3], the location of the initial failure significantly affects the behavior of the system during progressive collapse. As a rule, engineers model the removal of columns on the lower floors, because, firstly, the probability of anomalous impact is much higher, and secondly, these columns are in the zone of the greatest load. Also, modeling the removal of a corner column has worse consequences on a local scale compared to another location, and on a global scale, the failure of an internal column can have more significant consequences.

The current stage of the progressive collapse modeling is focused on modeling the removal of a single column, as this is in line with accepted guidelines. However, given the statistical data, such simulations do not reflect real-world collapse scenarios where multiple columns may collapse at once, and more structures may be damaged.

In a general sense, the analysis of progressive collapse raises the issue of studying the correctness of load redistribution in case of failure of different structural elements and different numbers of failures of structural elements. Such redistribution can be influenced by:

- structural scheme;
- planned placement of structures, regularity of the grid, span sizes;
- ensuring spatial rigidity;
- number of stories;
- material of structural elements.

For example, according to recommendations [1], structures with more floors have a better load redistribution effect. The presence of more elements above the removed structure contributes to better redistribution [3].

An analysis of significant cases of progressive collapse of buildings and structures has shown that the load-bearing structures were mainly made of monolithic reinforced concrete or rolled steel. Structural schemes made of prefabricated elements, including precast concrete and wood, have not been studied much in the field of resistance to progressive collapse. The main problem of ensuring the resistance to progressive collapse of structural schemes made of precast concrete elements is a rather low value of the connection between the elements (welding of embedded parts), compared to other schemes, in particular monolithic ones. This is a direct violation of one of the key recommendations for ensuring resistance to progressive collapse, namely the installation of indistinguishability.

Conclusions:

1. Researchers in the field of progressive collapse are directly interested in cases of only the highest level of responsibility because the social, political, and economic impact of the loss of such buildings and structures is the most significant. As of the middle of the third decade of the 21st century, more than 40 thoroughly investigated cases of progressive collapse of buildings and structures of the highest level of responsibility have been recorded.

2. The collapse of the WTC towers became the starting point for intensifying the study of the progressive collapse phenomenon. After the event, a few scientific studies were performed and broad recommendations were issued to ensure resistance to progressive collapse, including options for modeling progressive collapse using numerical methods during design work.

3. The phenomenon of progressive collapse of buildings and structures is possible due to the occurrence of certain special impacts (causes of initiation) that cause the destruction of individual elements of buildings and structures. There is a distinction between the occurrence of this phenomenon due to off-design (abnormal) impact on structures, due to the effects of structural defects and the combined effect of the previous points.

4. Existing assessments of progressive collapse cases take into account the so-called degree of disproportionality of collapse (separation of the characterization of the cause of initiation, the magnitude of the initial damage, and the magnitude of the final damage). This is because it is only possible to guarantee resistance to progressive collapse if the collapse is only disproportionate.

5. One of the tasks from the point of view of ensuring the reliability of construction objects should not be the prevention of progressive collapse in general, but the prevention of disproportionate progressive collapse. In the case of failure to prevent progressive collapse, the priority is to ensure the delay in time of collapse of building objects.

6. Each type of progressive collapse characterizes the mechanics of collapse development in structures. The mixed type of progressive collapse is a certain combination of simple types. The analyzed world cases of progressive collapse show that in real conditions the collapse is extremely rare within one type. Mixed types prevail, where the pancake type of collapse is the most common (recorded in 87% of cases). This means that the initial collapse of, for example, one column leads to some localized collapse on a larger scale. Structures above the removed column, due to the lack of supporting vertical structures and the inability to withstand emergency loads, hit the structures below.

7. Initial collapse of one or more columns occurred in 45% of cases of progressive collapse (64% of which occurred simultaneously in two or more columns), indicating that modeling of progressive collapse due to sudden removal of columns is rational.

8. The search for realistic collapse scenarios, in particular the selection of a column that is suddenly removed from the scheme, should be based on a comparison of the probabilistic analysis of the occurrence of such a scenario.

9. In a general sense, the analysis of progressive collapse raises the issue of studying the correctness of load redistribution in case of failure of different structural elements and different numbers of failures of structural elements.

10. The analysis of significant cases of progressive collapse of buildings and structures showed that the load-bearing structures were mainly made of monolithic reinforced concrete or rolled steel. Structural schemes made of prefabricated elements, including precast concrete and wood, have not been studied much in the area of resistance to progressive collapse.

References

- General Service Administration. (2016, Jan. 28). *Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance*. [Online]. Available: https://www.gsa.gov/system/files/Progressive_Collapse_2016.pdf.
- [2] U. Starossek, *Progressive collapse of structures*. Second edition. Westminster, London: ICE Publishing; 2017. <http://dx.doi.org/10.1680/pcos.61682>.
- [3] N. Elkady, L. Augusthus Nelson, L. Weekes, N. Makoond, M. Buitrago, "Progressive collapse: past, present, future and beyond", *Structures*, no. 62, 2024.
- [4] J. Russell, "Progressive collapse of reinforced concrete flat slab structures", Ph.D. thesis, The University of Nottingham, UK, 2015.
- [5] R. Shankar Nair, "Progressive collapse basics", in *North American steel construction conference proceedings*, 2004.
- [6] N. Gardner, J. Huh, L. Chung, "Lessons from the sampoong department store collapse", *Cement and Concrete Composites*, vol. 24, pp. 523-529, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00068-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00068-3).
- [7] G. Caredda, N. Makoond, M. Buitrago, J. Sagasetta, M. Chryssanthopoulos, J.M. Adam, "Learning from the progressive collapse of buildings", *Developments in the Built Environment*, vol. 15, 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/J.DIBE.2023.100194>.
- [8] M. O. Vabishchevych, I. K. Fesun, "Pidkhody shchodo zabezpechennya stiykosti do prohresuyuchoho obvalennya budivel' ta sporud. Suchasnyy stan ta perspektyvy", *Opir materialiv i teoriya sporud: nauk.-tekhn. zbirnyk*. Kyiv, vol. 110, pp. 256-263, 2023.
- [9] F. Kiakojour, V. De Biagi, B. Chiaia, M.R. Sheidaii, "Progressive collapse of framed building structures: current knowledge and future prospects", *Engineering Structures*, vol. 206, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110061>.
- [10] U. Starossek, *Progressive collapse of structures*. Thomas Telford London, 2009.
- [11] U. Starossek, "Typology of progressive collapse", *Engineering Structures*, vol. 29, 2007.
- [12] J.M. Adam, F. Parisi, J. Sagasetta, X. Lu, "Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century", *Engineering Structures*, vol. 173, pp. 122–149, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.06.082>.
- [13] Important know-how on typology of progressive collapse. The constructor building ideas. [Online]. Available: <https://theconstructor.org/building/know-how-progressive-collapse/290721>. Accessed on: November 25.11.2024.
- [14] G. McKenzie, B. Samali, C. Zhang, "Review collapse mechanisms causing damage from controlled and uncontrolled demolitions", *Geomate Journal*, vol. 17, no. 59, pp. 197–203, 2019.

**АНАЛІЗ ЗАКОРДОННОГО ДОСВІДУ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПАДКІВ
ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД**

¹Фесун І.К., аспірант,
fesuni99@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6678-9900

¹Вабіщевич М.О., д.т.н., професор,
vabix@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0755-5186

¹Лукашевич Д.Ю., аспірант,
lukashevych_dy-2023@knuba.edu.ua, ORCID: 0009-0001-3555-2353

¹Київський національний університет будівництва і архітектури
просп. Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

Анотація. Одним із передових напрямків інженерної наукової спільноти є дослідження роботи конструкцій та систем загалом під час малоймовірних (екстремальних) подій, зокрема прогресуючого обвалення будівель і споруд. Відомо про численну кількість випадків обвалення будівель і споруд різного роду призначення та рівня відповідальності, а вже дослідникам у сфері прогресуючого обвалення цікавлять випадки лише найвищого рівня відповідальності, це пояснюється тим, що соціальний, політичний та економічний вплив втрати таких будівель та споруд найсуттєвіший.

Метою роботи є всебічний аналіз явища прогресуючого обвалення будівель і споруд на основі досвіду закордонних визначних випадків. До аналізу винесено: причини ініціації прогресуючого обвалення, ступінь непропорційності прогресуючого обвалення, види прогресуючого обвалення, конструктивні особливості випадків прогресуючого обвалення.

У дослідженні використано підхід, що включає не лише результати аналізу безпосередніх випадків прогресуючого обвалення, а і наведено статистичну характеристику залежно від причини ініціації, виду обвалення, геометричного розміщення початкового пошкодження. Особливу увагу приділено відповідності прийнятих методик моделювання прогресуючого обвалення до реальних випадків прогресуючого обвалення.

Результати дослідження показали, що існуючі оцінки випадків прогресуючого обвалення враховують так званий ступінь непропорційності обвалення. Це пояснюється тим, що гарантування забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення можливе лише за умови, якщо обвалення лише є непропорційним. Початкове руйнування однієї або декількох колон відбулось у близько половини випадків прогресуючого обвалення свідчить про раціональність моделювання прогресуючого обвалення через раптове видалення колон.

Подальші дослідження можуть бути зосереджені на пошуку реальних сценаріїв обвалення, зокрема вибір колони, що раптово видаляється із схеми, дослідженні коректності перерозподілу навантажень при раптовому видаленні колони, дослідженні забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення будівель з конструктивними схемами, що виконані із деревини або збірного залізобетону.

Ключові слова: прогресуюче обвалення, ступінь непропорційності, руйнування, видалення колони, моделювання, конструктивні особливості, стійкість.

Стаття надійшла до редакції 28.11.2024

CONSTRUCTION MORTAR BASED ON MECHANOACTIVATED PORTLAND CEMENT WITH THE ADDITION OF GROUND LIMESTONE

¹**Barabash I.V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
dekansti@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0241-4728

¹**Gorbovyi O.L.**, graduate student,
gorbovoy@gmail.com, ORCID: 0009-0001-5425-4327

¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
str. Didrikhsona, 4, Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. In the practice of production of building solutions, cements with the use of mineral additives and, in particular, ground limestone are widely used. Technologically, such mixed cements can be obtained both by compatible grinding of Portland cement clinker, dihydrate gypsum and limestone additive, and by thorough mixing of Portland cement with ground limestone. A promising method for improving the mechanical characteristics of building solutions is intensive mechanic-chemical activation of mixed cements in high-speed turbulent mixers. The issues considered in the article related to determining the influence of recipe and technological factors on the strength of building mortar at the age of 3, 7 and 28 days were investigated. The compressive strength of samples made from a mixture solution on both a mechanically activated binder and a binder of similar composition, but which was not subject to mechanical activation, was studied. The experimental studies were carried out using the D-optimal mathematical plan with variation of the following factors: X_1 – the ratio of the mass of the mixed binder to the mass of unground quartz sand in the construction mortar (from 1:3 to 1:1); X_2 – ground limestone content in the mixed binder (20 ± 20 %); X_3 – consumption of the superplasticizing additive Relaxol-Super PC (0.5 ± 0.5 % of the binder weight). The obtained mathematical models indicate that the maximum effect (of the listed factors) on the strength of the mortar is exerted by the content of the mechanically activated binder in it. An increase in its consumption in the composition of the mortar mix causes an increase in the strength of the mortar at the age of 3 days from 24 to 40.5 MPa, i.e. by almost 70 %. At the age of 28 days, the effect of the consumption of the activated mixed binder on the strength of the mortar is somewhat reduced and does not exceed 60 %. The next factors influencing the strength of the mortar are the consumption of superplasticizer and the percentage of ground limestone. The combined effect of mechanochemical activation in the presence of 1 % Relaxol-Super PC allows the introduction of up to 40 % ground limestone into Portland cement, while providing the same compressive strength of the mortar as when using non-mechanically activated Portland cement, but without the addition of ground limestone.

Keywords: mortar, mechanochemical activation, lime mixture, binder, portland cement, ground limestone.

Introduction. In the practice of manufacturing concrete and reinforced concrete products, cements using ground limestone are widely used. Such cements are obtained both by joint grinding of Portland cement clinker, gypsum dihydrate and limestone mineral additive, and by thorough mixing of Portland cement with ground limestone. A promising method for improving the mechanical characteristics of a building solution is the mechanochemical activation of Portland cement in combination with the use of superplasticizing additives and mineral fillers. Ensuring a high degree of cement activation is achieved through the use of high-speed forced-action activators that provide the binder with additional chemical activity, thereby increasing the quality indicators of the final product. Mechanochemical methods of activating Portland cement fit quite easily into existing technological schemes for obtaining mortar mixtures, which allows, in our opinion, to more fully reveal the potential of both the binder and the building solutions based on it.

Analysis of the latest research and publications. Considering the realities of the production of Portland cements with mineral additives in Europe, as well as Ukraine's desire to take its place in the European cement market, issues related to the study of their influence, and in particular, limestone, on the properties of mortars and concretes are becoming very important [1-5]. The use of mineral additives in the technology of Portland cement production makes it possible to save both fuel energy and electrical energy [6]. In addition, the introduction of a finely dispersed carbonate additive ($S \geq 650 \text{ m}^2/\text{kg}$) into the composition of Portland cement leads to an increase in the specific surface area of the binder, which contributes to the compaction of hardened cement stone [7]. It is known [8] that as a result of the chemical interaction between ground limestone and aluminates phases of Portland cement clinker, calcium hydrocarboaluminates $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ are formed, which contribute to increasing the strength of cement stone [9]. Thus, it can be stated that CaCO_3 has a positive effect on both the structure of cement stone and the mechanical characteristics of mortars and concretes.

The issues considered in the article are related to determining the influence of ground limestone on the strength of the mortar. In this regard, the need to create optimal combinations of Portland cement with this finely dispersed mineral additive (mixed binder) becomes obvious. The presence of ground limestone helps to increase the potential of the mixed binder both from an economic point of view and from an environmental point of view [10-12]. The fact of increasing the efficiency of introducing finely ground mineral additives into cement during its mechanical activation using high-speed activators is undeniable [13, 14]. The use of high-speed activators helps to solve a set of issues related to both improving the homogeneity of the freshly prepared mortar mixture and increasing the mechanical characteristics of the hardened composite [15].

Purpose of the research. The aim of this work is to experimentally confirm the production of a building mortar with improved mechanical characteristics through the use of mechanical activation of Portland cement in the presence of ground limestone (mixed binder) and a superplasticizing additive (SP).

Research methods. Mechanochemical activation of the aqueous composition of Portland cement, as well as a mixture of binder with ground limestone and superplasticizer, was carried out in a high-speed mill ($n = 1800 \text{ rpm}$) for 180 sec. A mixture of similar composition was used for control, but it was not subject to mechanochemical activation. For the joint determination of the influence of the studied factors on the compressive strength of the mortar, a three-factor experiment was carried out, where the following independent factors were taken: consumption of mixed binder in the mortar, consumption of ground limestone in the mixed binder and consumption of SP Super PK).

Research results. Portland cement PC II/A-SH-500, which meets the requirements of DSTU B V.2.7-46:2010 "General-purpose cements. Specifications", was used as a binder in the experimental studies. The mineralogical composition of Portland cement clinker includes, "mass %": $\text{C}_3\text{S} - 7.5 \dots 7.7$; $\text{C}_2\text{S} - 13 \dots 15$; $\text{C}_3\text{A} - 7.5 \dots 7.7$; $\text{C}_4\text{AF} - 10.6 \dots 11.6$. The content of alkali oxides (in terms of Na_2O) is $0.18 \dots 0.24 \%$. Limestone from the Odessa quarry "Yuzhny" was used as a carbonate additive. Before use, the limestone was ground to a specific surface of $625 \text{ m}^2/\text{kg}$. Along with Portland cement, a homogeneous mixture of Portland cement with the addition of ground limestone in the amount of 20 and 40 % was used in the studies.

To determine the effect of mechanical activation of the cement-water composition with the addition of ground limestone on the change in the water-solid ratio, the compositions of the mixed binder given in Table 1 were used.

The experimental data given in Table 1 indicate that the mechanochemical activation of the cement-water composition has a positive effect on the decrease in the water-solid ratio of equiviscous compositions from 0.42 (no activation) to 0.38 (activation period of 180 sec). A similar effect of mechanical activation on the change in the water-solid ratio is also observed for cement-water compositions with the addition of ground limestone in the amount of 20 and 40 %. A special feature of the effect of adding ground limestone is that increasing its content in the binder to 40 % causes an increase in the W/S ratio for both mechanically activated and non-mechanically activated binders by an average of 7...10 %.

Table 1 – Mixed binder compositions

Composition number	Portland cement, %	Ground limestone, %	Activation of mixed binder, s	Spread of the mixture cone, mm	W/S
1	100	0	0	120	0.42
2	100	0	180	120	0.38
3	80	20	0	121	0.44
4	80	20	180	120	0.41
5	60	40	0	11	0.45
6	60	40	180	120	0.42

As for the kinetics of the change in the spread diameter of aqueous cement-containing compositions depending on the duration of mechanical activation and the content of ground limestone, it should be noted that mechanical activation causes a more intense thickening of the mixture, which is manifested in a sharp decrease in the spread diameter over time, Table 2.

Table 2 – Kinetics of reduction of the diameter of the mixture cone spread depending on the activation period and the limestone content in the binder

Curing period, h	№ composition					
	1	2	3	4	5	6
0	120	120	120	120	120	120
0.5	109	95	112	104	115	111
1	104	76	105	93	109	105
1.5	95	63	95	71	98	96
2	83		81	63	87	80
2.5	70		75		83	66
3	61		69		77	64
3.5			62		70	
4					65	
4.5					61	

The compressive strength of 4×4×16 cm beam samples made of mortar mix both on mechanically activated binder and on binder of similar composition, but which was not subject to mechanochemical activation, was investigated.

Experimental studies were conducted using the D-optimal plan. The following factors were varied in the experiment:

X_1 – ratio of the mass of mixed binder to the mass of unground quartz sand in the mortar composition – (1:3; 1:2; 1:1);

X_2 – consumption of ground limestone in mixed binder – (20±20 %);

X_3 – consumption of Relaxol-Super PC – (0.5±0.5 %).

The consumption of mixing water for each line of the mathematical plan was taken based on obtaining the spread diameter on the shaking table in the range of 140±5 mm. The specified spread diameter of the mixture was taken to be the same for the two comparative technologies. The experimental plan and compositions of the studied building solutions are presented in Table 3.

Table 3 – Experimental plan and compositions of building solutions

№	Levels of independent factors			C:S	Content of dry components of the mortar mixture per batch			
					Composition of mixed binder		Quartz sand, g	Superplastic izer, g
	X ₁	X ₂	X ₃		Portland cement, g	Ground limeston, g		
1	-	-	-	1:3	500	-	1500	0.0
2	-	+	-	1:3	300	200	1500	0.0
3	0	0	-	1:2	534	133	1333	0.0
4	+	-	-	1:1	1000	-	1000	0.0
5	+	+	-	1:1	600	400	1000	0.0
6	-	0	0	1:3	400	100	1500	2.5
7	0	-	0	1:2	667	-	1333	3.4
8	0	0	0	1:2	534	133	1333	3.4
9	0	+	0	1:2	400	267	1333	3,4
10	+	0	0	1:1	800	200	1000	5.0
11	-	-	+	1:3	500	-	1500	5.0
12	-	+	+	1:3	300	200	1500	5.0
13	0	0	+	1:2	534	133	1333	6.7
14	+	-	+	1:1	1000	-	1000	10.0
15	+	+	+	1:1	600	400	1000	10.0

As a result of statistical processing of experimental data, polynomial models (1-4) were obtained for the dependence of the compressive strength of mortar at 3 and 28 days of age on the studied factors:

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

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

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

$$R_{com}^{c.28} = 29,8 + 8,2X_1 + 3,3X_1^2 - 0,9X_1X_2 + 0,6X_1X_3 - 3,9X_2 - 1,2X_2^2 - 0,5X_2X_3 + 4,5X_3 \quad (4)$$

where: $R_{\text{com}}^{m,3}$, $R_{\text{com}}^{m,28}$ – strength of mortar on mechanically activated mixed Portland cement at 3 and 28 days of age, MPa;

$R_{\text{com}}^{c,3}$, $R_{\text{com}}^{c,28}$ – strength of mortar on mixed Portland cement, which was not subject to mechanical activation (control) at 3 and 28 days of age, MPa.

The consideration of the coefficients for independent factors in mathematical models (1-4) shows that for a building mortar both on a mechanically activated binder and on a binder that has not been subjected to mechanical activation, the maximum effect on the strength of the composite is exerted by both the content of the mixed in (X_1) in it and the consumption of SP. This is confirmed by the single-factor graphical dependencies shown in Fig. 1.

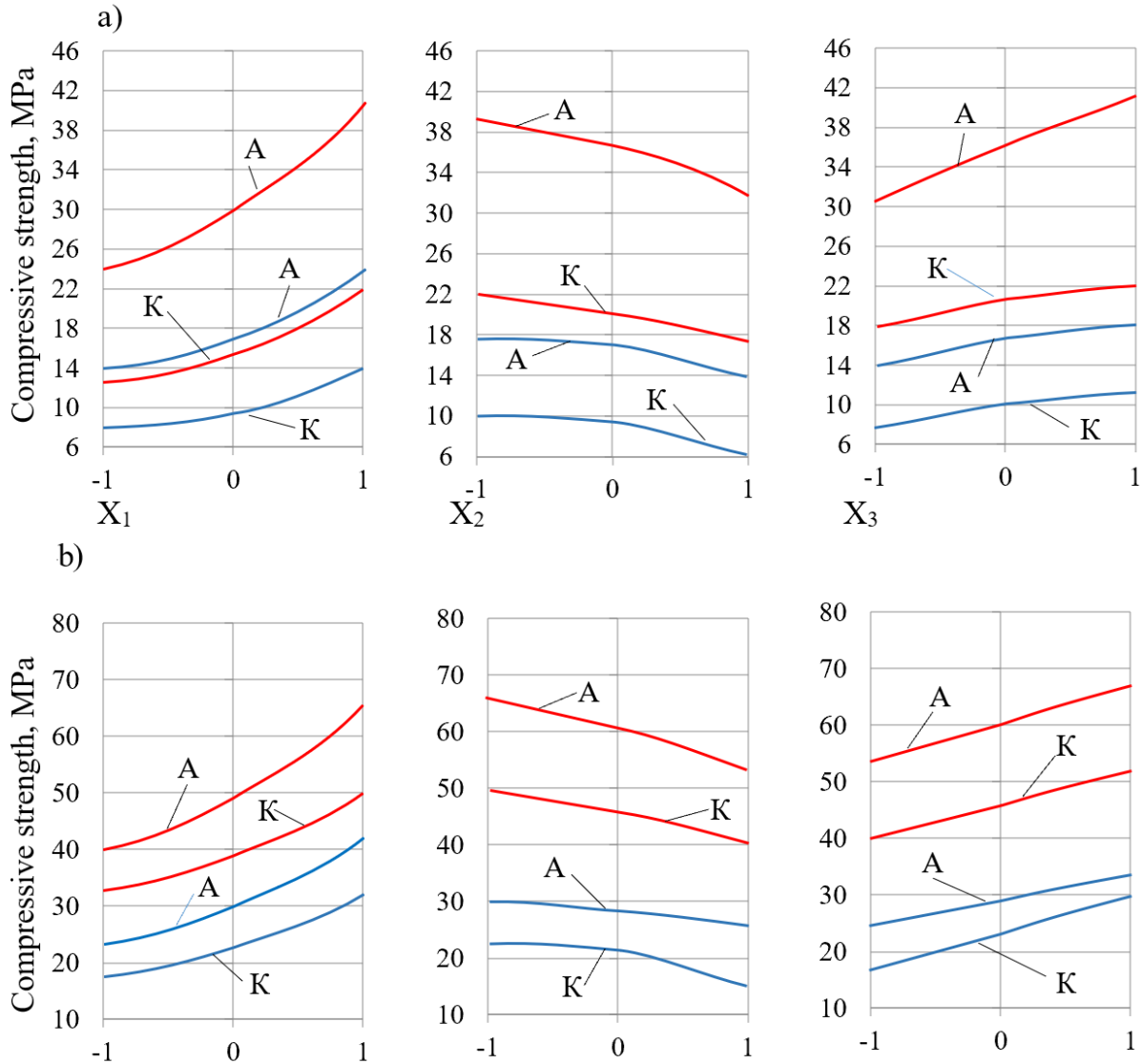


Fig. 1. The influence of formulation factors on the strength of the mortar under compression in the maximum (—) and minimum (—) zones:

a – strength of mortar at 3 days of age; b – strength of mortar at 28 days of age; K – control (strength of samples on binder that was not subject to mechanical activation); A – strength of samples on mechanically activated binder

Analyzing the experimental data, it should be noted that an increase in the content of mechanically activated mixed binder in the composition of the mortar mixture (the ratio of the mass of binder to the mass of quartz sand) leads to an increase in the strength of the mortar at a 3-day age from 24 MPa to 40.5 MPa, i.e. by almost 70%. At the age of 28 days, the effect of the content of activated mixed binder on the strength of the mortar is slightly reduced and is 62.5%. With respect to the effect of the superplasticizing additive on the strength of the mortar on the mechanically

activated binder, it should be noted that an increase in the consumption of SP from 0 to 1% leads to an increase in the strength of the cement-mixed samples at the age of 3 days from 31 MPa to 41.2 MPa, i.e. by almost 35 %, and at the age of 28 days from 52 MPa to 67 MPa. As for the effect of ground limestone content on the compressive strength of the mortar in the maximum zone, it should be noted that at the age of 3 days, an increase in limestone consumption in the mixed binder from 0 to 40% causes a decrease in the compressive strength of the mortar from 40.5 to 32 MPa, i.e. by almost 23 %. For a mortar on a mechanically activated binder at the age of 28 days, the introduction of 40 % ground limestone into the binder leads to a decrease in the strength of the samples (compared to the use of Portland cement without the addition of ground limestone) by 23 % to 35 MPa. As for the effect of mechanical activation on the strength of the mortar, it should be noted that the maximum effect from high-speed processing of the cement-mixing composition with the addition of ground limestone is observed at the age of 3 days – in this case, the increase in the strength of the mortar is at least 60 %. At 28 days of age, the effect of mechanical activation decreases and the increase in the strength of samples on activated binder (compared to the control) is no more than 30...32 %.

Conclusions:

1. The combined effect of mechanical activation of the mixed binder and the use of the superplasticizer Relaxol-Super PC in an amount of 1 % ensures the production of a building mortar with a compressive strength of 65 MPa at 28 days of age, which is 30...32 % higher than the strength of a mortar of similar composition of a mixed binder that is not subject to mechanical activation.

2. Mechanochemical activation of a cement-containing aqueous composition with the addition of 40 % limestone ensures the production of a mortar with the same compressive strength at 28 days of age as in the case of using non-mechanically activated Portland cement, but in the complete absence of limestone addition to it.

References

- [1] R.F. Runova, V.I. Gots, M.A. Sanickij ta in. *Konstrukcijni materialy novogo pokolinnya ta tehnologiyi yih vprovadzheniya v budivnictvi*. Kyiv: EksOb, 2008.
- [2] M.A. Sanytskyi, Kh.S. Sobol, T.Ie. Markiv, *Modyfikovani kompozytsiini tsementy*. Lviv: Lvivska politehnika, 2010.
- [3] M. Sanytsky, T. Kropyvnytska, I. Geviuk, *Design of multimodal quaternary Portland composite cements with high early strength*. 20 th Internationale Baustofftagung, Weimar, Germany. 2018.
- [4] M. Scheider, *The cement industry on the way to low-carbon future*. Cement and Concrete Research. 2019.
- [5] V.V. Kozlova, A.M. Maniukha i dr. *Vlyanye karbonatsoderzhashchykh dobavok na svoystva kompozytsionnykh tsementov*. Tsement y eho pryomenenye. 2012.
- [6] S. Lindner, H. Ludwig, H. Moller, H. Wachtler, *Production and properties of CEM II/B-M Portland composite cements*. Dusseldorf: VDZ Congress. 2003.
- [7] Y. Shtark, V. Berd, *Tsement y yzvest*. Oranta, 2008.
- [8] W. Locher Friedrich, *Cement-Prinziples of production and use*. Verlag Bau Technic GmbH. 2006.
- [9] Z. Geergiczny, J. Malolepszy, J. Szwabowski, J. Sliwinski, *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonow nowej generacji*. Gorazdze cement. Opole, 2002.
- [10] M.A. Sanitsky, T.P. Kropivnitskaya, V.M. Gevyuk, *Bistrotverdeyushchie klinkeroeffektivnie tsementi i betoni*. Monograph. Lviv: Prostir-M LLC, 2021.
- [11] B.H. Rusyn, *Vysokofunktsionalni betony na osnovi portlandtsementiv, modyfikovanykh ultradispersnyimi mineralnymi dobavkami*. Lviv: Lvivska politehnika, 2014.
- [12] M. Shnaider, Z. Beuner, *Ekonomycheskye y tekhnicheskye preymushchestva kompozytsionnykh tsementov*. Tsement y eho pryomenenye. 2016.

- [13] L.Y. Dvorkin, V.V. Zhitkovsky, V.V. Marchuk, Y. Stasyuk, M.M. Violinist, *Effektivnie tekhnologii betonov i rastvorov s uprochneniem tekhnogennogo siryu*. Monograph. Rivne: NUVKhP, 2017.
- [14] R.F. Runova, Yu.L. Nosovskyi, *Tekhnologiya modifitsirovannikh stroitelnykh rastvorov*. Kyiv: KNUBA, 2007.
- [15] V.N. Vyrovov et al., *Mekhanicheskaya aktivatsiya v tekhnologii betona*. OGASA. 2014.

БУДІВЕЛЬНИЙ РОЗЧИН НА МЕХАНОАКТИВОВАНОМУ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТІ З ДОБАВКОЮ МЕЛЕНОГО ВАПНЯКУ

¹Барабаш І.В., д.т.н., професор,
dekansti@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0241-4728

¹Горбовий О.Л., аспірант,
gorbovoy@gmail.com, ORCID: 0009-0001-5425-4327

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, Україна, 65029

Анотація. В практиці виробництва будівельних розчинних сумішей та розчинів на їх основі широке розповсюдження одержали цементні з використанням мінеральних добавок і зокрема, меленого вапняку. Технологічно такі змішані цементні суміші можливо отримувати як сумісним помелом портландцементного клінкеру, двоводного гіпсу та добавки вапняку так і ретельним змішуванням портландцементу з меленим вапняком. Перспективним методом покращення механічних характеристик будівельних розчинів є інтенсивна механохімічна активація змішаних цементів в швидкісних змішувачах турбулентного типу. Розглянуті у статті питання пов'язані з визначенням впливу рецептурно-технологічних факторів на міцність будівельного розчину в 3-х, 7-ми та 28-и добовому віці. Досліджувалась міцність при стиску зразків, які були виготовлені із розчину суміші як на механоактивованому в'язучому так і на в'язучому аналогічного складу, але яке механоактивації не підлягало. Експериментальні дослідження проводилися з використанням Д-оптимального математичного плану з варіюванням наступних факторів: X_1 – цементно-піщане відношення (від 1:3 до 1:1); X_2 – вміст меленого вапняку у змішаному в'язучому (20 ± 20 %); X_3 – витрата суперпластифікуючої добавки Релаксол-Супер ПК ($0,5 \pm 0,5$ % від маси в'язучого). Одержані математичні моделі свідчать про те, що максимальний вплив (із перерахованих факторів) на міцність будівельного розчину надає вміст механоактивованого в'язучого в ньому. Зростання його витрати в складі розчинової суміші викликає підвищення міцності будівельного розчину в 3-х добовому віці з 24 до 40,5 МПа, тобто майже на 70 %. В 28-и добовому віці вплив витрати активаного змішаного в'язучого на міцність будівельного розчину дещо зменшується і не перевищує 60 %. Наступними по впливу факторами на міцність будівельного розчину є витрата суперпластифікатору та процентний вміст меленого вапняку. Сумісний вплив механохімічної активації в присутності 1 % Релаксол-Супер ПК дозволяє вводити в портландцемент до 40 % меленого вапняку, забезпечуючи при цьому таку ж міцність при стиску будівельного розчину, як у разі використання немеханоактивованого портландцементу, але без добавки меленого вапняку.

Ключові слова: будівельний розчин, механохімічна активація, вапняна суміш, в'язуче, портландцемент, мелений вапняк.

Стаття надійшла до редакції 28.11.2024

MECHANOACTIVATION OF MIXED BINDING AGENT AND ITS INFLUENCE ON THE STRENGTH OF CONSTRUCTION MORTAR¹**Davidchuk V.G.**, graduate student,

oldsnakes19@gmail.com, ORCID: 0009-0001-5425-4327

¹**Barabash I.V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,

dekansti@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0241-4728

¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
st. Didrikhsona, 4, Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. The issues considered in the article are related to determining the effect of mechanical activation of a mixed binder on the properties of a building mortar. The study involved partial replacement of cement with ground crystalline quartz sand and amorphous microsilica (hereinafter MS) in combination with the use of the superplasticizer Relaxol-Super PC (hereinafter SP). The amount of ground sand was adjusted in the range from 0 to 40%, MS from 0 to 10% and SP from 0 to 1% of the binder mass. The activation period of the binder was 180 sec. The use of this formulation allows increasing the strength and reducing the consumption of Portland cement in the technology of manufacturing a building mortar. The obtained experimental data confirmed the influence of formulation and technological factors on the water-solid ratio of the cement-containing composition. It was found that the main contribution to the reduction of the water-solid ratio (provided that equiviscous compositions are obtained) is made by mechanical activation in combination with the replacement of 40% of cement with ground quartz sand and the addition of 1% SP. The water-solid ratio decreases by more than 50%, which has a positive effect on the strength of the solution.

The increase in the strength of the mortar with the addition of SP reached 93% (at the early stages of hardening) and 56% (at the grade age) compared to the control. The use of MS in the composition of the mortar provides a relatively small increase in strength (12%) at the early stages of hardening and 8% at the grade age compared to the control.

The use of mechanical activation alone provides an increase in the strength of the mortar by 18% (at the early stages of hardening) and 13% (at the grade age) compared to the control. The combined effect of mechanical activation, SP and MS in the composition of the building solution compensates for the negative impact of ground quartz sand and has a positive effect on the growth of strength (up to 38%), ensuring a reduction in cement consumption by 40%.

Keywords: Portland cement, ground quartz sand, superplasticizer, microsilica, mechanical activation, mortar.

Introduction. In the technology of manufacturing mortar, the most expensive component is cement. In this regard, mixed cements with the use of active and inert mineral additives are becoming increasingly relevant. A promising method for improving the physical and mechanical characteristics of hardened composites is the use of mechanical activation. The issues considered in the article are related to determining the combined effect of the technological factor (mechanical activation), as well as the formulation factors (ground quartz sand, SP and MS) on the strength of the mortar.

Analysis of the latest research and publications. One of the important problems of the technology of production of mixed cements is the creation of optimal combinations of Portland cement with mineral additives, the presence of which increases the potential capabilities of the binder [1-3]. In this regard, the replaceable part of Portland cement with mineral additives [4, 5], in addition to economic efficiency, helps to obtain a binder with improved properties [6-8].

To solve the problem of improving the properties of cement stone and building composites based on it, various methods have been created [9], among which mechanochemical methods of activating the binder are promising [10, 11]. Among the existing methods of activating the hydration processes of cement compositions, turbulent high-speed mixers of various designs are widely used [12].

The use of surfactants is extremely important in the technology of manufacturing resource-saving building solutions [13-15]. Such additives are often used both individually and in combination with other additives of synthetic or natural origin [16]. Their presence reduces excess water during the preparation of the mortar, which increases its strength [17, 18].

The use of such ultrafine additives as MS promotes a denser packing of concrete components due to the microscopic size of its particles [19]. To maintain the proper consistency of concrete containing MS, it is also necessary to use SP [20]. The addition of MS increases adhesion and reduces the porosity of the contact zone of the filler with the cement mortar [21].

It is expected that the use of mechanical activation in combination with the use of ground quartz sand, MS and SP will lead to a decrease in the consumption of Portland cement while simultaneously increasing the strength of the mortar.

Objectives and tasks. The aim of the work is to determine the effect of mechanical activation of a mixed binder in the presence of SP on the compressive strength of a building mortar.

Materials and research methods. The consistency of the cement-water composition with the addition of ground quartz sand was taken to be such that its spread diameter on a shaking table was in the range of 140±5 mm. Quartz sand was ground in a ball mill for 60 minutes. Activation of only Portland cement and a mixture of Portland cement with ground sand was carried out in an aqueous medium, in a mechanical activator for 180 sec.

Polycarboxylate superplasticizing additive Relaxol – Super PC was used as an additive for plasticizing the mixture. Ground quartz sand (specific surface area 0.056 m²/g) and MS (specific surface area 20 m²/g) were used to replace cement.

Cement-sand mortar on a non-mechanically activated binder without the addition of ground quartz sand, SP and MS was used for control. The separate and combined effects of mechanical activation, ground quartz sand, SP and MS on the strength of the mortar were assessed by testing 4x4x16 cm beam samples for compression at the age of 1, 7 and 28 days of hardening. The composition of the mortar mixture for making the samples was taken as 1:1 (binder:sand). The compositions of the mixtures for making the samples were taken as given in Table 1. A three-factor experiment was conducted to determine the effect of variable factors on the strength of the samples.

Table 1 – Three-factor experiment plan, mixture compositions and the effect of RTF on W/S

Composition number	Factor levels			Portland cement, %	Ground quartz sand, %	SP, %	MS, %	W/S	
	X ₁	X ₂	X ₃					control	activation
1	-	-	-	100	0	0	0	0.377	0.344
2	-	+	-	100	0	1	0	0.225	0.215
3	0	0	-	80	20	0.5	0	0.26	0.245
4	+	-	-	60	40	0	0	0.333	0.309
5	+	+	-	60	40	1	0	0.204	0.187
6	-	0	0	100	0	0.5	5	0.251	0.238
7	0	-	0	80	20	0	5	0.345	0.324
8	0	0	0	80	20	0.5	5	0.241	0.228
9	0	+	0	80	20	1	5	0.223	0.201
10	+	0	0	60	40	0.5	5	0.226	0.213
11	-	-	+	100	0	0	10	0.36	0.341
12	-	+	+	100	0	1	10	0.22	0.211
13	0	0	+	80	20	0.5	10	0.236	0.224
14	+	-	+	60	40	0	10	0.33	0.305
15	+	+	+	60	40	1	10	0.202	0.186

Table 1 shows the plan of the three-factor experiment and the experimental data reflecting the influence of the recipe and technological factors (RTF), namely: a) the content of ground sand in the binder – X_1 (20±20%); b) the concentration of SP – X_2 (0.5±0.5%); c) the consumption of MS – X_3 (5±5%); d) mechanical activation (180 sec) on the water-solid ratio (W/S) of cement-containing aqueous compositions. The choice of factors is associated with the possibility of ensuring the strength of samples above 30 MPa.

Research results. In the studies, Portland cement PC II/A-Sh-500 was used as a binder. The binder meets the requirements of DSTU B V.2.7-46:2010 "General-purpose cements. Specifications". The mixed binder was obtained by jointly grinding Portland cement and quartz sand in an amount of 20 and 40%. Quartz sand with $M_{sz} = 2.2$ was used as a filler for the mortar.

The experimental data presented in Table 1 indicate that the use of mechanical activation, ground quartz sand, SP and MS in the cement-water composition has a positive effect on reducing the water-solid ratio of equiviscosity compositions from 0.377 (control) to 0.186 (activation, maximum consumption), i.e. by more than 46%. It should be noted that the main contribution to the decrease in the water-solid ratio is provided by SP (the W/S ratio decreases from 0.377 to 0.223, i.e. by almost 41%). The second largest influence on the decrease in the W/S ratio is the factor of ground sand (it decreases from 0.377 to 0.333, i.e. by more than 11%). The third factor in terms of influence on the reduction of the W/S ratio is the mechanical activation factor (it decreases from 0.377 to 0.344, i.e. by more than 8%), the last factor in terms of influence is MS (it decreases from 0.377 to 0.36, i.e. by more than 4%).

The compressive strength properties of the mortar (responses) are given in Table 2.

Table 2 – Compressive strength of mortar

Composition number	Responses					
	R_{COM}^{CONT} , MPa			R_{COM}^{MECH} , MPa		
	1 day	7 days	28 days	1 day	7 days	28 days
1	21.5	39.8	46.0	25.4	44.7	51.8
2	41.5	68.7	71.9	51.9	76.8	83.7
3	18.3	37.3	43.0	24.0	42.9	50.3
4	12.1	24.1	31.2	15.6	27.7	36.1
5	26.5	47.0	50.9	31.1	52.3	56.4
6	36.9	57.1	62.4	43.9	63.2	70.5
7	12.7	29.5	38.0	15.4	33.6	42.3
8	21.3	46.2	52.8	24.8	54.9	60.1
9	20.3	57.4	60.6	25.9	67.6	67.9
10	20.2	36.9	40.9	26.9	42.2	49.1
11	24.1	43.5	49.7	29.4	47.5	52.5
12	43.4	72.2	75.9	54.2	79.3	87.2
13	21.9	48.3	52.5	30.5	57.9	61.3
14	12.3	25.5	32.1	15.6	29.6	38.7
15	24.6	49.1	56.1	32.7	54.7	63.8

Note: R_{COM}^{CONT} – compressive strength of mortar on non-activated binder on the 1st, 7th and 28th day;

R_{COM}^{MECH} – compressive strength of mortar on mechanically activated binder on the 1st, 7th and 28th day.

Experimental statistical models reflecting the influence of variable composition factors on the compressive strength of mortar on the 28th day, on non-activated (1) and mechanically activated (2) binders, are presented on the models:

$$R_{com}^{cont28} = 49,8 - 9,2X_1 + 2,6X_1^2 - 1,4X_1X_2 + 0,2X_1X_3 + 11,9X_2 + 0,3X_2^2 + 0,7X_2X_3 + 2,2X_3 - 1,3X_3^2 \quad (1)$$

$$R_{com}^{mach28} = 57,2 - 10,1X_1 + 3,3X_1^2 - 2,6X_1X_2 + 0,6X_1X_3 + 13,7X_2 - 1,4X_2^2 + 1,0X_2X_3 + 2,7X_3 - 0,7X_3^2 \quad (2)$$

Note: R_{com}^{mach28} – strength of mortar based on mechanically activated binder; R_{com}^{cont28} – strength of mortar on non-activated binder.

Analysis of mathematical models (1, 2) indicate that, according to the values of the coefficients for the variable factors, the greatest influence on the compressive strength of the mortar for the grade age of hardening is exerted by the content of ground sand and SP in it.

The effect of the amount of ground sand and the concentration of SP on the strength of the mortar is confirmed by the experimental data, which are graphically reflected in Fig. 1, 2.

For the mortar on a non-mechanically activated binder at the age of one day, Fig. 1, an increase in the consumption of SP from 0 to 1% (factors X_1 and X_3 are at the level of -1) ensures an increase in the strength of the mortar from 21.5 MPa to 41.5 MPa, i.e. almost 2 times. At the age of 7 days, an increase in the consumption of SP contributes to an increase in the strength of the mortar from 39.8 MPa to 68.7 MPa, i.e. more than 72%. At the brand age, the mortar strength increases from 46 MPa to 71.9 MPa, i.e. by more than 56%. This allows us to state that the use of SP provides the greatest (of the factors used) strength increase at the early stages of hardening. For more distant hardening periods, the effect of SP on the mortar strength decreases and does not exceed 56% at the age of 28 days.

An increase in the consumption of ground quartz sand in the binder leads to a decrease in the strength of the building mortar. For the building mortar at the age of one day on a non-mechanically activated binder, Fig. 1, an increase in the consumption of ground sand from 0 to 40% (factors X_2 and X_3 are at the level of -1) leads to a decrease in the strength of the mortar from 21.5 MPa to 12.1 MPa, i.e. by almost 44%. At the age of 7 days, an increase in the consumption of ground sand leads to a decrease in the strength of the mortar from 39.8 MPa to 24.1 MPa, i.e. by more than 39%. At the brand age, the increase in the consumption of ground sand leads to a decrease in the mortar strength from 46 MPa to 31.2 MPa, i.e. by more than 32%. Thus, it can be stated that the greatest impact on the decrease in the mortar strength due to the introduction of a binder into the composition occurs at the early stages of hardening.

The increase in the consumption of MS in the binder leads to an insignificant increase in the mortar strength. For a daily-aged mortar on a non-mechanically activated binder, Fig. 1, an increase in the consumption of MS from 0 to 10% (factors X_1 and X_2 are at the level of -1) ensures an increase in the mortar strength from 21.5 MPa to 24.1 MPa, i.e. by almost 12%. At the age of 7 days, an increase in the mortar strength is observed from 39.8 MPa to 43.5 MPa, i.e. by more than 9%. At the brand age, the increase in the strength of the solution due to the introduction of MS does not exceed 8% (from 46 MPa to 49.7 MPa).

Mechanical activation of the binder leads to an increase in the strength of the mortar. The effect of mechanical activation for the mortar at the brand age, Fig. 2, is on average 15% (compared to the strength of the mortar on a non-activated binder) of the increase in strength. For the mortar at the age of one day on a mechanically activated binder, Fig. 1, the use of mechanical activation for 180 sec (factors X_1 , X_2 and X_3 are at the level of -1) provides an increase in the strength of the mortar from 21.5 MPa to 25.4 MPa, i.e. by more than 18%. At the age of 7 days, mechanical activation provides an increase in the strength of the mortar from 39.8 MPa to 44.7 MPa, i.e. by more than 12%. At the brand age, an increase in the strength of the mortar is observed from 46 MPa to 51.8 MPa, i.e. by more than 13%.

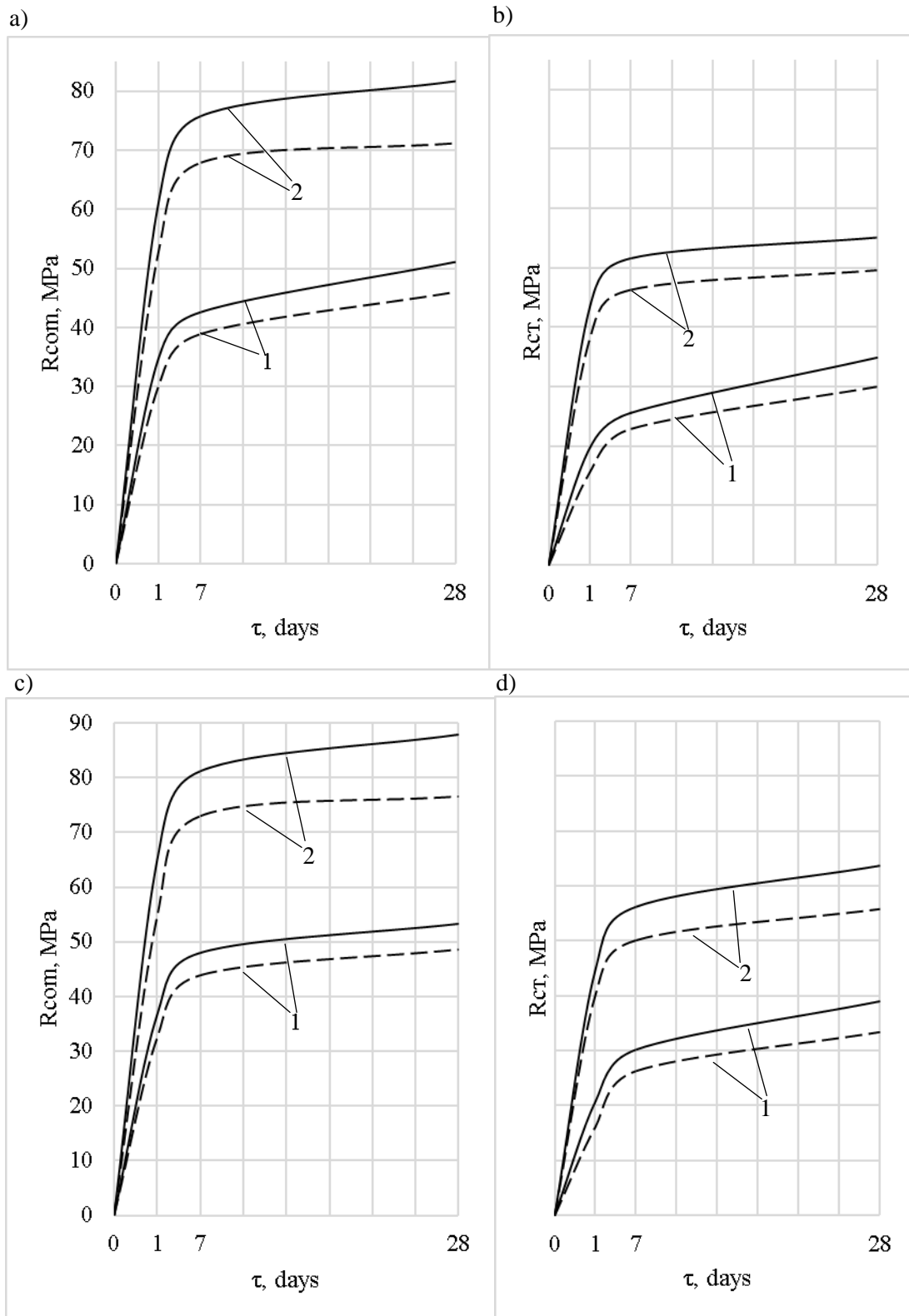


Fig. 1. The effect of curing time on the strength of mortar:
 a, b – content of ground sand in the binder 0 and 40%, respectively, content of microsilia 0%;
 c, d – content of ground sand in the binder 0 and 40%, respectively, content of microsilia 10%;
 ----- – solution on mechanically activated (for 180 sec) binder;
 - - - - - solution on non-activated binder (control);
 1, 2 – superplasticizer consumption 0 and 1% respectively (from the mass of the binder)

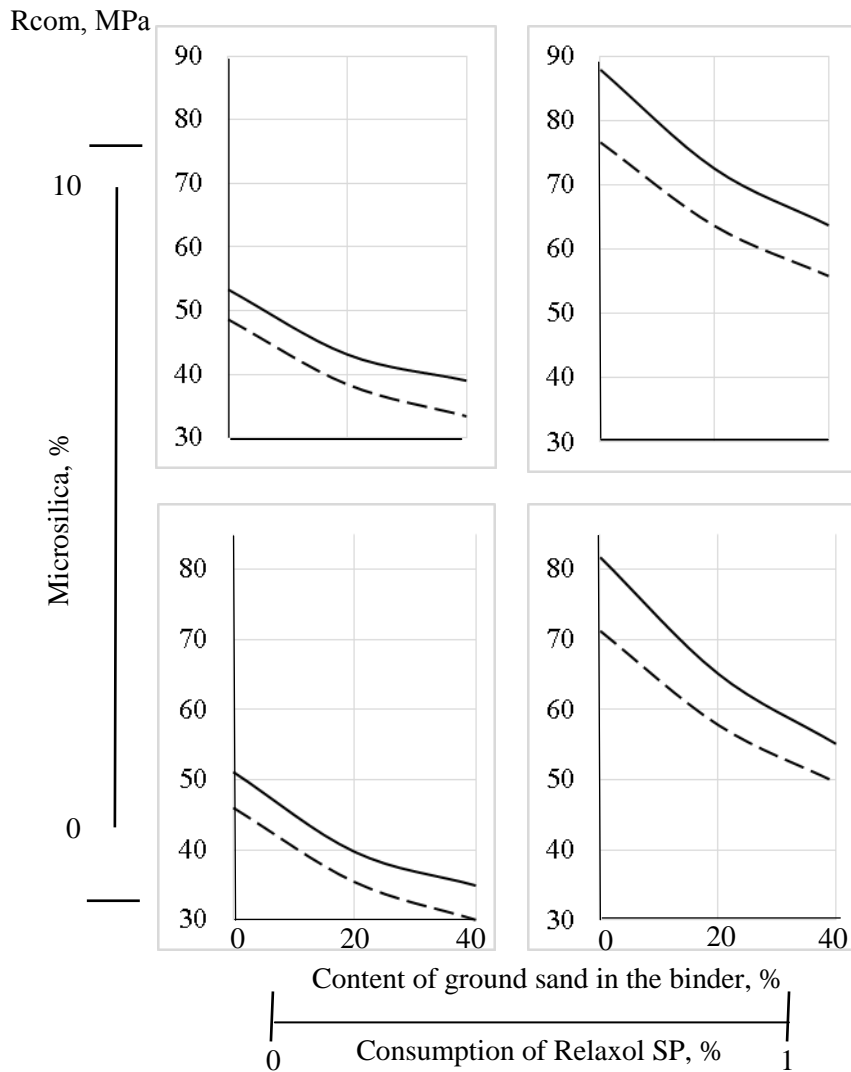


Fig. 2. The effect of the content of ground quartz sand and the concentration of SP in the binder on the compressive strength of the mortar at 28 days of age:

- solution on mechanically activated binder;
- solution on non-activated binder (control)

Shown in Fig. 1, 2 experimental data indicate that the combined effect of mechanical activation, introduction of SP and MS into the composition of the building solution compensates for the negative effect of ground quartz sand and has a positive effect on the growth of compressive strength. Such a composition provides an increase in strength from 46 MPa (control) to 63.8 MPa (activation, factors X_1 , X_2 and X_3 are at level 1), i.e. by more than 38% and reduces the consumption of Portland cement from 30 to 40%.

Conclusions:

1. An increase in the level of variable factors (ground quartz sand, SP and MS in the composition of the mortar) and the use of mechanical activation have a positive effect on the decrease in the water-solid ratio of equal-viscosity mortar mixtures (on average up to 50% compared to the control). The main contribution to the decrease in the water-solid ratio is provided by SP (almost 41% of the total).

2. The combined effect of mechanical activation, SP (1%) and MS (10%) in the composition of the mortar compensates for the negative impact of ground quartz sand (40%) and has a positive effect on the growth of its strength at grade age, which is 35–40% (compared to the control).

References

- [1] M.A. Sanitsky, T.P. Kropivnitskaya, V.M. Gevyuk, *Klinkerno-efektyvni tsementy ta betony shvydkoho tverdinnia*. Monohrafiia. Lviv: TOV «Prostir-M, 2021.
- [2] L.I. Dvorkin and others, *Efektivni tehnologiyi betoniv i rozchiniv iz zmicnennyam tehnogennoyi sirovini*. Monografiya. Rivne: NUVGP, 2017.
- [3] R.F. Runova, Yu.L. Kosovsky, *Tehnologiya modifikovanih budivelnih rozchiniv*. Kiyiv: KNUBA, 2007.
- [4] S.V. Koval, *Modeling and optimization of the composition and properties of modified concrete*. Odessa: Astroprint, 2012.
- [5] V. I. Gots, *Betoni ta budivelni rozchini*. Kiyiv: UVPK Eks Ob, 2003.
- [6] N.V. Kondratieva, "Nanotekhnolohii u vyrobnytstvi budivelnykh materialiv", *Budivnytstvo Ukrainy*, no. 6, pp. 2-9, 2012.
- [7] B.G. Rusin, *Visokofunkcionalni betoni na osnovi portlandcementiv, modifikovanih ultradispersnimi mineralnimi dobavkami*: avtorec. dis. na zdobuttya nauk. st. k.t.n. za spec. 05.23.05. Nacionalnij universitet "Lvivska politehnika". Lviv, 2014.
- [8] A.V. Usherov-Marshak, A.V. Kabus, "Funkcionalno-kinetichnij analiz vplivu dobavok na tverdinnya cementu", *Neorganichni materiali*, vol. 52, no. 4, pp. 479-484, 2016. doi.org/10.1134/S0020168516040129
- [9] V.N. Vyrovoy, *Kompozicijni budivelni materiali ta konstrukciyi. Struktura, samoorganizaciya, vlastivosti*. Odesa: Vid-vo "TES", 2010.
- [10] L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin, Yu.V. Garnitsky, *Modifikovani zolovmisni suhi budivelni sumishi dlya muruvalnih ta klejovih rozchiniv*. NUVGP. Rivne, 2013.
- [11] M.V. Shpyrko, T.M. Dubov, "Doslidzhennya vplivu elektromagnitnoyi aktivaciyi koncentrovanoyi cementnoyi suspenziyi na vlastivosti cementnogo kamenyu ta betonu", *Visnik PDABA*, no. 2, pp. 102-107, 2020.
- [12] A.G. Maslov, Yu.S. Salenko, E.V. Stukota, "Rozrobka ustanovki dlya vibromehanichnoyi obrobki budivelnih sumishej", *Visnik Harkivskogo nac. avtodor. un-tu*, vol. 57, pp. 59-62, 2012.
- [13] O. Shkromada, A. Paliy, O. Yurchenko, N. Khobot, A. Pikhtirova, "Influence of fine additives and surfactants on the strength and permeability degree of concrete", *EUREKA: Physics and Engineering*, no. 2, pp. 19-29, 2020. doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001178
- [14] Kligys, Modestas & LAUKAITIS, Antanas, "The Influence of Some Surfactants on Porous Concrete Properties", *Materials Science*, vol. 13, no. 4, pp. 310-316, 2007.
- [15] Linbo Jiang, Zhi Wang, Xueliang Gao, "Effect of nanoparticles and surfactants on properties and microstructures of foam and foamed concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 411, 2024. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134444
- [16] Łaźniewska-Piekarczyk, Beata & Miera, Patrycja & Szwabowski, Janusz, "Plasticizer and Superplasticizer Compatibility with Cement with Synthetic and Natural Air-Entraining Admixtures", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 245, no. 3, 2017. doi.org/10.1088/1757-899X/245/3/032094
- [17] Mehran Khan, Majid Ali, "Effect of super plasticizer on the properties of medium strength concrete prepared with coconut fiber", *Construction and Building Materials*, vol. 182, pp. 703-715, 2018. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.150
- [18] Dzigita Nagrockiene, Ina Pundienė, Asta Kicaite, "The effect of cement type and plasticizer addition on concrete properties", *Construction and Building Materials*, vol. 45, pp. 324-331, 2013. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.076
- [19] Nilforoushan, Mohammad, "The Effect of Micro Silica on Permeability and Chemical Durability of Concrete Used in the Corrosive Environment", *Iranian journal of chemistry & chemical engineering-international english edition*, vol. 24, no. 2, pp. 31-37, 2005. doi.org/10.30492/ijcce.2005.8122

- [20] Rahman Md. Asifur & Zawad, Md. Fahad & Priyom Sudipto, "Potential use of microsilica in concrete: a critical review", *Conference: 5th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE 2020)*. Bangladesh: Chittagong University of Engineering & Technology, 2021.
- [21] Ehsan Hosseinzadehfard, Behnam Mobaraki, "Investigating concrete durability: The impact of natural pozzolan as a partial substitute for microsilica in concrete mixtures", *Construction and Building Materials*, vol. 419, 2024. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135491.

МЕХАНОАКТИВАЦІЯ ЗМІШАНОГО В'ЯЖУЧОГО ТА ЇЇ ВПЛИВ НА МІЦНІСТЬ БУДІВЕЛЬНОГО РОЗЧИНУ

¹Давидчук В.Г., аспірант,
oldsnakes19@gmail.com, ORCID: 0009-0001-5425-4327

¹Барабаш І.В., д.т.н., професор,
dekansti@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0241-4728

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, Україна, 65029

Анотація. Розглянуті у статті питання пов'язані з визначенням впливу механоактивації змішаного в'язучого на властивості будівельного розчину. Дослідження полягало у частковій заміні цементу меленим кристалічним кварцовим піском та аморфним мікрокремнеземом (в подальшому МК) в поєднанні з використанням суперпластифікатора Релаксол-Супер ПК (в подальшому СП). Кількість меленого піску корегувалася в діапазоні від 0 до 40%, МК від 0 до 10% та СП від 0 до 1% маси в'язучого. Термін активації в'язучого складав 180 сек. Застосування даної рецептури надає можливість підвищити міцність та знизити витрати портландцементу в технології виготовлення будівельного розчину.

Одержані експериментальні дані підтвердили вплив рецептурно-технологічних факторів на водотверде відношення цементно-вміщуючої композиції. Встановлено, що основний вклад в зниження водотвердого відношення (при умові одержання рівнов'язких композицій) надає механоактивація в сукупності із заміною 40% цементу меленим кварцовим піском і додаванням 1% СП. Водотверде відношення зменшується більше, ніж на 50%, що позитивно відображається на міцності розчину.

Зростання міцності будівельного розчину з додаванням СП досягало 93% (на ранніх термінах тверднення) та 56% (у марочному віці) в порівнянні з контролем. Використання МК у складі будівельного розчину забезпечує відносно незначне зростання міцності (12%) на ранніх термінах тверднення та 8% у марочному віці в порівнянні з контролем.

Використання тільки механоактивації забезпечує зростання міцності розчину на 18% (на ранніх термінах тверднення) та 13% (у марочному віці) в порівнянні з контролем. Сумісна дія механоактивації, СП та МК у складі будівельного розчину компенсує негативний вплив меленого кварцового піску та позитивно відображається на зростанні міцності (до 38%), також забезпечуючи зниження витрати цементу на 40%.

Ключові слова: портландцемент, мелений кварцовий пісок, суперпластифікатор, мікрокремнезем, механоактивація, будівельний розчин.

Стаття надійшла до редакції 1.12.2024

**РОЛЬ ДИСКРЕТНОЇ АРМАТУРИ В ОРГАНІЗАЦІЇ МІКРОСТРУКТУРИ
ДЕКОРАТИВНИХ КОМПОЗИТІВ**

¹Довгань О.Д., к.т.н., доцент,
aleks.dovhan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6140-3159

¹Вировой В.М., д.т.н., професор,
vyrovoy@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8818-4112

¹Довгань П.М., к.т.н.,
dovganpm@gmail.com, ORCID: 0009-0002-3603-7617

¹Макарова С.С., к.т.н., доцент,
svetlana.makarova@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3237-1431

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. У статті пропонується декоративні матеріали і виробу розглядати у вигляді відкритих складноорганізованих систем, які перманентно взаємодіють з навколишнім середовищем і реагують на всю сукупність зовнішніх впливів. З метою збереження функціональних властивостей на заданому рівні пропонується застосовувати багаторівневе дискретне армування матеріалу виробів. Дискретна арматура, як вихідна складова здатна приймати участь в процесах структуроутворення на всіх рівнях структурної неоднорідності декоративного композиту. Механізм організації мікроструктури дисперсно-армованого матеріалу вивчався на різних моделях різних дисперсних систем. Експериментальні дослідження проводились в декілька етапів. На першому етапі використовувалися моделі фізичної взаємодії часток дисперсної фази на поверхні моделі дисперсного середовища. На другому етапі для оцінки ступеня дисперсності фібри та аналізу кінетики утворення кластерних підструктур мікроструктури армованих композитів застосовувалися фізичні моделі глиняно-водних і полімервміщуючих систем.

Здійснений аналіз моделей міжчасткових взаємодій дозволив встановити, що наповнення кластерних структур дискретною арматурою збільшує структурне різноманіття системи. Залежно від співвідношення лінійних часток і дисперсних зерен утворюються кластерні підструктури різної природи. Аналіз властивостей різних складів глиняної композиції доводить, що різноманітність кластерних підструктур надає можливість поліпшити структурні параметри дисперсній системі. Дослідження показали, що величина об'ємних деформацій визначається початковим складом глини. Використання фібри оптимальної геометрії в композиціях забезпечує отримання структур зі значно меншою кількістю дефектів. Для неспростовного доказу того, що лінійні частки спроможні до сприйняття і перерозподілу деформацій, на прикладі виготовлених фізичних моделей, розглянуто розподіл залишкових напружень і деформацій в оптично-чутливому полімері. Візуальний аналіз картин смуг полімерних зразків продемонстрував, що присутність фібри в складі композиту змінює характер розподілу об'ємних деформацій.

Ключові слова: декоративний композит, структура, фібра, дисперсна система, кластер, деформації.

Вступ. Складні умови експлуатації декоративних елементів потребують від матеріалу зберігати протягом нормованого часу певний рівень фізико-механічних властивостей та декоративних показників. Це можливо досягти за рахунок здатності матеріалу до прояву спонтанних процесів пристосування до несприятливих дій навколишнього середовища. Своєю чергою адаптивна спроможність матеріалу та виробу в цілому залежить від особливостей оформлення їх структури. Структурну будову любых об'єктів доцільно вивчати та аналізувати, як показав накопичений досвід, в рамках системного підходу. Для цього декоративні

матеріали, виробу і конструкції варто розглядати у вигляді відкритих складноорганізованих систем, які здатні до прояву процесів самоорганізації. Відкритість припускає, що система перманентно взаємодіє зі своїм оточенням та здатна адекватно реагувати на зовнішні впливи. Складні системи означають, що декоративні об'єкти являють собою певну цілісність, яка включає в себе окремі складноорганізовані підсистеми з характерними неповторними для кожної підсистеми механізмами перманентного структуроутворення. Під явищами та процесами самоорганізації, в контексті даної роботи, розуміються самовільні зміни параметрів елементів структури в індивідуальних підсистемах, що спонукає їх до прояву ефектів саморегулювання, взаємодій і взаємовпливів з метою збереження на заданому рівні базових функціональних властивостей цілісної системи.

Проведений аналітичний огляд науково-технічної інформації показав, що фізико-механічні властивості практично всіх матеріалів і виробів на основі мінеральних в'язучих залежать від якісного та кількісного складу несучильностей. До несучильностей відносяться пори, капіляри, внутрішні поверхні розділу та тріщини. Їх присутність зафіксована на всіх рівнях структурних неоднорідностей (підсистем). В силу того, що несучильності не входять до переліку вихідних складових, тож постає нагальна задача, пов'язана з відповіддю на узагальнені питання, як, чому, коли та де вони виникають. З'явившись, несучильності стають самостійними елементами структури на всіх рівнях неоднорідностей. Їх своєрідна автономність веде до активної участі в розвитку вологісних деформацій, капілярному підсоші, водопоглинанні, в дифузійних процесах масопереносу, перерозподілі власних і зовнішніх деформацій, концентрації деформацій та напружень, морозостійкості та багато інших процесів. Таким чином, несучильності слід віднести до елементів структури здатних впливати на забезпечення безпечного функціонування будівельних композитів.

Одним із ефективних методів зменшення негативної дії несучильностей, як показав огляд літератури, є застосування дискретних лінійних армуючих компонентів самої широкої номенклатури. Дискретна арматура розглядається у вигляді унікальної складової, яка одночасно присутня на різних рівнях неоднорідностей (в різних підсистемах). Вона входить до складу вихідних компонентів, що обов'язково вимагає розглядати механізми структуроутворення з участю лінійних дискретних елементів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проведений огляд фахових досліджень показав, щоб пояснити механізм поліпшення чи навпаки погіршення властивостей будівельних композитів належить добре вивчити мікроструктуру матеріалу виробів. Загалом отримання оптимальної структури бетону, тобто із меншою кількістю дефектів і дрібними їх розмірами, повинно ґрунтуватись на комплексному підході до конструювання структур на його мікро- й макрорівнях. В рамках поліструктурної теорії визначено, що формування якісних структур матеріалу має здійснюватися шляхом створення на кожному рівні його структурної неоднорідності певних наборів кластерних підструктур, які характеризуються більш стійкою до внутрішніх і зовнішніх впливів міжфазною границею розділу [1-4]. За даними E.J. Garboczi, D.R. Bentz та ін. [5] мікроструктура бетону є досить невпорядкованою, яка складається з надзвичайно складних агрегованих структур здебільшого з фрактальною морфологією. Представлені в [6-7] мікоморфологічні дослідження показують, що міжфазна перехідна зона цих структур є досить пористою і вважається найслабшою областю, в якій під час структуроутворення матеріалу утворюються різні дефекти. При цьому під впливом постійних внутрішніх напружень, пов'язаних із становленням мікроструктури композитів, дефекти мають здатність проростати на міжкластерну межу розділу і надалі стрімко розвиватися на стику двох фаз.

В численних роботах матеріалознавців показано, що органо-мінеральні добавки в цементних композитах позитивно впливають на процеси структуроутворення і, відповідно, покращують будівельно-технічні й декоративні властивості бетону. Із аналізу робіт В.І. Соломатова, В.М. Вирового та ін. [1-4, 8-9] випливає, що за допомогою поверхнево-активних часток наповнювачів можна управляти не лише кінетикою набору структурної міцності, але й будовою капілярно-пористої структури цементного каменю, підвищуючи його стійкість до

впливу кліматичних навантажень. Проте є протиріччя щодо впливу якісного й кількісного складу наповнювачів. Це обумовлено тим, що мікроструктура перехідної зони тісно пов'язана з дисперсною природою цементної матриці. Втім геометричні параметри і вміст зерен наповнювачів безперечно відіграють важливу роль у стримуванні накопичення дефектів і розвитку тріщин на міжкластерних границях розділу мікроструктури композиту. За даними [9-12], міжчасткові взаємодії зерен цементу і наповнювачів можна суттєво пришвидшити за рахунок використання ефективних водоредуруючих добавок, й отримати мікроструктуру бетону більш щільною, дрібнокристалічною, міцною і з більшою площею прямих контактів між агрегатами. Однак зі зростанням структурної міцності стрімко підвищується чутливість бетону до утворення дефектів на всіх рівнях. Тож актуальності набуває багаторівневе дискретне армування його структур. В дослідженнях вітчизняних і закордонних вчених встановлено [13-17], що при введенні фібри різної природи й геометрії підвищується в'язкість руйнування за рахунок уповільнення процесу утворення тріщин або створення бар'єру для них. Але поряд з конструктивним впливом, можливий і деструктивний вплив фібри на формування дисперсної структури бетону. У випадку, коли геометричні параметри, вміст чи розподіл дискретних волокон виходять за межі оптимуму, тоді може спостерігатися її «грудкування» (утворюються фіброві кластерні локальні підструктури різної форми в загальній структурі матеріалу, число прямих контактів фібрових моноволокон з матрицею значно скорочується) по всьому об'ємі або на окремих ділянках структури композиту. Через «грудкування» фібри в об'ємі матеріалу можуть виникати і розвиватися додаткові об'ємні деформації, котрі призводять до появи тріщин, як в мікрооб'ємі поверхні розділу, так і на границі розділу. Своєю чергою огляд зображень контактних зон дискретної арматури із цементною матрицею, представлених Maso J.C. в [18] показує, що вид і геометрія фібри впливає на формування міжфазної перехідної зони в композитах. Ventur A., Brant A.M., Chung D.D.L., Katz A. та ін. [13-14, 19-20] зазначають, що для отримання більш стійкого пружного зв'язку між складовими перехідної зони мікроструктури бетону необхідно використовувати високодисперсні моноволокна, котрі є гідрофільними і добре диспергуються в пластифікованій цементній суміші. При цьому занадто міцний зв'язок матриці з фіброю не є бажаним, оскільки зменшується гнучкість й режим її руйнування. Для досягнення оптимального розподілу і певного зчеплення між всіма частками цементної матриці фахівцями рекомендується для армування мікроструктури проєктувати лінійні частки довжиною $l_f < 10$ мм та, які за поперечним перерізом є співрозмірними із середнім діаметром зерен цементу й наповнювача. З огляду на це площа поверхні й тип контакту фібри з дисперсними частками є вирішальними факторами, які забезпечують ефективний армуючий ефект у створенні внутрішнього стійкого зв'язку між всіма агрегатами композиту. Однак через складність процесів гідратації цементного в'язучого на сьогодні не повною мірою розкрито сам механізм участі фібри в фізико-механічних процесах структуроутворення будівельних композитів. Представляється доцільним оптимізувати процес утворення кластерних структур за рахунок використання різної за довжиною гібридної дискретної арматури. Це дозволить ущільнити міжфазну перехідну зону, поліпшити зв'язки між структурними агрегатами, знизити кількість дефектів під час становлення структури матеріалу, а границям розділу більш рівномірно розподіляти внутрішні напруження між фазами композиту й стримувати рух тріщин в них під впливом силових і несилових навантажень. Доречно відмітити, що попередньо проведені нами дослідження структурних параметрів глиняної й цементної систем [21] дозволили встановити, що введення фібри безсумнівно призводить до зміни фізико-механічних процесів структуроутворення в'язучих систем.

Мета роботи – підвищення експлуатаційних властивостей декоративних матеріалів і виробів за рахунок направленою використання самовільних процесів багатоосередкового структуроутворення, шляхом цілеспрямованої зміни якісного і кількісного складів дискретної арматури.

Матеріали та методика досліджень. Для всебічного вивчення і підтвердження активної участі дискретних волокон в організації структури дисперсно-армованих будівельних

композитів експериментальні дослідження проводилися в декілька етапів на різних фізичних моделях різних дисперсних систем.

На першому етапі для відтворення процесу організації структурних агрегатів на мікрорівні цементного композиту використовувалися моделі фізичної взаємодії часток дисперсної фази на поверхні моделі дисперсійного середовища. Досліди проводилися в чашці Петрі. В дослідженні прийнято десять різних видів фізичних моделей: моделі дисперсних зерен або часток різної природи (три види), моделі дисперсних і лінійних часток (сім видів). Під час відтворення міжчасткових взаємодій введено такі обмеження: діаметр дисперсних зерен і поперечний переріз лінійних часток близькі за розміром; лінійні частки різні за довжиною; концентрація часток дисперсної фази в системі така, що між ними виникає сила притягання F_n ; сила зв'язку між частками більше сили тяжіння F_T ; взаємодія часток фіксувалась кожен хвилину протягом 10 хв; частки дисперсної фази розміщалися на поверхні водного середовища у вільному порядку. В ролі дисперсних зерен призначено мінеральні й органічні частки, лінійних часток виступають дискретні моноволокна (фібра) різної довжини. Залежно від природи часток, відстаней між частками та співвідношень форм дисперсних і лінійних часток в системі реалізується декілька механізмів утворення структурних агрегатів і взаємодій між ними. Для кількісного аналізу, через пройдений шлях кожної частки, обчислено середню швидкість утворення кластерів (v , мм/хв).

На другому етапі для оцінки ступеня дисперсності дискретних волокон та аналізу кінетики утворення кластерних підструктур мікроструктури армованих композитів застосовувалися фізичні моделі в'язучих систем. Дослідження модельних систем проводились на зразках-дисках розміром 100×10 мм ($\varnothing \times h$).

Для вивчення процесу структуроутворення виготовлялись сім різних за складом глиняно-водних композицій, серед яких: один склад – неармований (#1), три – армовані фіброю однієї довжини 3, 6, 12 мм (#2, #3, #4); три – гібридно-армовані фіброю різної довжини в комбінації 3 і 6 мм, 3 і 12 мм, 6 і 12 мм (#5, #6, #7). Фіксованими складовими в експерименті були водо-глиняне співвідношення $V/\Gamma = 0.5$, дискретна арматура вводилась від маси глиняної суміші в загальній кількості 0.06 %. Зразки висушувались при температурі 23 ± 2 °С. Під час досліджень структурні показники глиняних систем визначались у віці зразків 7 днів.

Для наочного підтвердження участі дискретних волокон в процесах структуроутворення виготовлялись дві різні за складом епоксидні композиції: базова без фібри (для порівняльної оцінки) та гібридно-армована фіброю довжиною 3 і 12 мм, в кількості 0.06 % від загальної маси полімерної композиції.

Аналіз результатів досліджень. Механізм структуроутворення цементно-водних і полімервміщуючих композицій на модельних системах, з використанням зерен різної природи й розмірів, детально розглянуто в ряді робіт В.М. Вирового, В.Г. Суханова, О.О. Коробко [2-4]. Результати отримані вченими дозволили дійти висновку, що початкова самоорганізація мікроструктури композитів напряму залежить від якісного й кількісного складів зерен дисперсної фази і прийнятих методів активації. Зі свого боку проведені експериментальні спостереження (*1-й етап досліджень*) за перебігом міжчасткових взаємодій, різних складів зерен, на поверхні моделей водного середовища дійсно підтверджують, що в первинно неупорядкованих дисперсних системах, залежно від природи зерен дисперсної фази і відстані між ними за однаковий відтинок часу, утворюється різна кількість структурних агрегатів, відмінних за кількістю часток і розмірами.

Для опису та наочного спостереження за процесом утворення кластерних підструктур у поєднанні із лінійними частками на рис. 1 продемонстровано дві із семи, різних за складом часток, модельних систем взаємодій дисперсних зерен і моноволокон. Представлені в роботі в спрощеному виді фізичні моделі надають змогу реально зрозуміти як первинно створюються кластерні підструктури в'язучих систем, армованих фіброю. На поверхні модельних систем виділено ділянки з частками дисперсної фази ($\tau_0 = 0$ хв), котрі впродовж 10 хв самоорганізуються у блоки різної форми «A-D» і «A-F» (τ_{10} , рис. 1, а та б). Залежно від хіміко-мінералогічного складу дисперсних часток цементу і наповнювачів, а також взаємодії

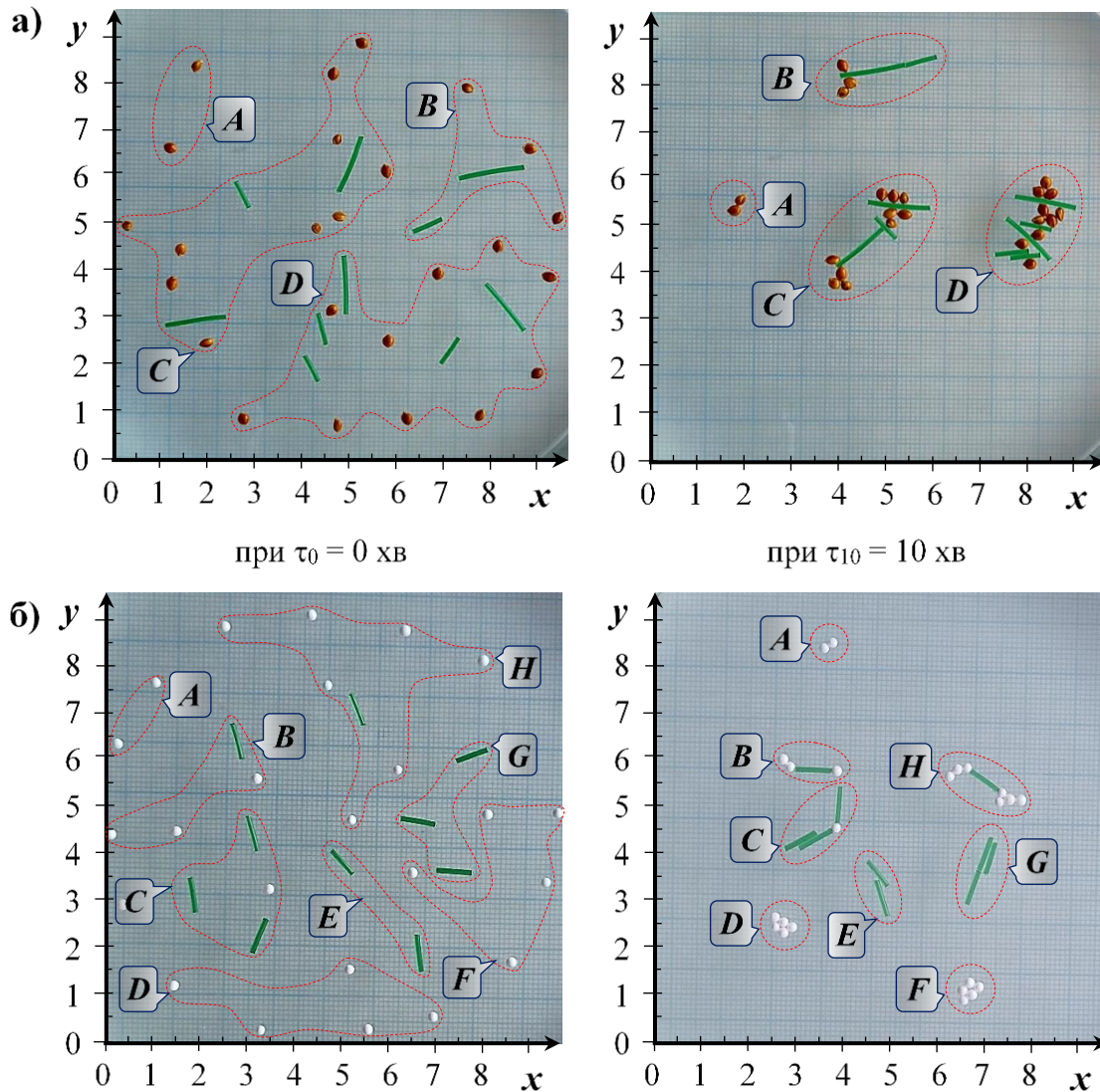


Рис. 1. Моделювання процесу самоорганізації структурних агрегатів впродовж 10 хв: мінеральних (а) й органічних зерен (б) з лінійними частками

лінійних часток з водою, збирання кластерів без прикладання зовнішніх сил відбувається в певному порядку. Одні дисперсні частки можуть покривати поверхні моноволокон із всіх сторін, інші – лише деякі ділянки їх поверхні. Крім цього, з огляду на якісні характеристики та кількісний склад зерен і лінійних часток, армована дисперсна система через τ_{10} складається із структурних агрегатів більш різноманітних за складом, розмірами й будовою у порівнянні з неармованою. Спочатку формуються кластери малі за розміром, а надалі об'єднуючись між собою створюються агрегати більших розмірів, наприклад, «C» і «D» (τ_{10} , рис. 1, а). Разом з цим помічено, що первинні кластери перед зчепленням здійснюють взаємний поворот один відносно одного, намагаючись таким чином контактувати ділянками поверхні часток однієї природи. На додаток елементи одного кластеру здатні добре компонуватися з елементами іншого агрегату, впроваджуючись між собою. В системі утворюються кластери різні за об'ємом й протяжністю, однакові за площею поверхні часток. Водночас виявлено, що групування часток в агрегати не завжди протікає за правилом малої відстані між ними. Лінійні частки, як і дисперсні зерна спроможні «розпізнавати» стан поверхні одна одної та переміщатися до собі подібних. По мірі того як знижується концентрація зерен в системі, фібра (особливо більшої довжини) може компонуватися між собою через активні центри торцевих частин, створюючи таким чином дискретні лінійні агрегати. Здебільшого це спостерігається на модельних системах із присутністю органічних зерен (ОЗ). Причому ОЗ винятково контактують із фіброю через поперечний зріз її сторін (рис. 1, б) і можуть слугувати

ланкою при формуванні видовженого кластера, наприклад, перколяційного. У процесі дослідження теж зафіксовано, що при кластер-кластерній взаємодії можливий перерозподіл агрегатів між собою (τ_{10} , рис. 1, б). Втім із присутністю мінеральних зерен в дисперсній системі, лінійні кластери здатні потовщуватись, збільшуючись в об'ємі. Своєю чергою аналіз модельних систем міжчасткових взаємодій на рис. 1а, і відповідних ним, дозволив встановити, що дискретні волокна можуть виступати активним осередком навколо поверхні яких групуються мінеральні зерна. Організуються більш об'ємні й однорідні за початковим складом часток структурні агрегати, наприклад, фрактальні. До того ж фібра в упорядкованих кластерах може орієнтуватися через зерна симетрично стосовно себе або під різним кутом, який зокрема, можуть теж задавати дисперсні частки при зміні свого положення в агрегатах. При цьому швидкість самоорганізації кластерних підструктур в структурі системи залежить від кількісного складу зерен і волокон. В табл. 1 через пройдений шлях кожної частки впродовж 10 хв визначено середню швидкість структурування кластерів (рис. 1). Проведені дослідження переконують, що лінійні частки не лише можуть змінювати властивості

Таблиця 1 – Середня швидкість (v , мм/хв) упорядкування часток в агрегатах протягом τ_{10}

Номер рисунку	Позначення кластеру							
	«A»	«B»	«C»	«D»	«E»	«F»	«G»	«H»
Рис. 1а	3.66	5.20	3.50	5.41	-	-	-	-
Рис. 1б	3.20	2.42	2.82	3.72	2.01	3.11	1.73	2.82

міжфазної перехідної зони, але й, брати активну участь у створенні дискретних структур різної геометрії й складу, змінюючи таким чином періоди набору структурної міцності дисперсної системи.

В роботі додатково проаналізовано механізм процесу утворення кластерів різної форми. Під час наглядання за рухом зерен і моноволокон котрі знаходяться під перманентним впливом силового поля, виявлено, що частки при переміщенні у просторі постійно змінюють своє положення. Як приклад, на рис. 2 показано, як послідовно самоорганізуються частки в кластери («A» і «B» рис. 1, а; «C» рис. 1, б) впродовж τ_{10} , при початковій фіксації їх положення в центрі вузлами й стрілками через кожні 2 хв. Підтверджується, що характер процесу

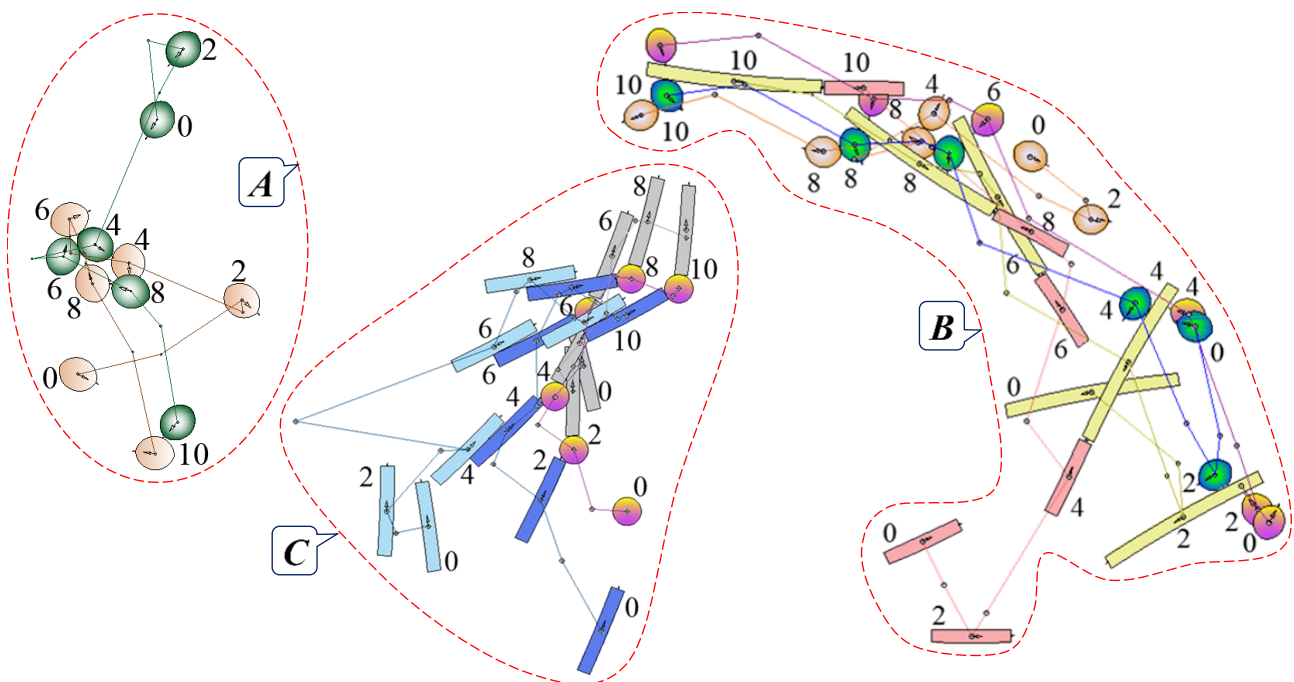


Рис. 2. Поетапний рух часток різної геометрії при вибірковій їх взаємодії з утворенням кластерів різної протяжності

утворення і росту агрегатів різної природи залежить від геометрії дискретних часток та їх співвідношення. Кластери можуть утворюватися в результаті синхронного приєднання з прискоренням зерен до фібри, і навпаки. Однак дисперсні й лінійні частки на поверхні дисперсійного середовища рухаються із різною швидкістю і по різним траєкторіям, складних за видом, змінюючи наразі положення та величину кута початкового просторового орієнтування (τ_0). Слід зауважити, що швидкість руху всіх часток стрімко падає після їх об'єднання чи приєднання до первинно утворених агрегатів (τ_{10} , рис. 1). Надалі відбувається перегрупування часток, в результаті чого формуються структурні агрегати з більш компактним розташуванням їх складових і покращеною силою зчеплення між ними.

Здійснений аналіз моделей міжчасткових взаємодій дає підстави зробити проміжний висновок, що наповнення кластерних структур дискретною арматурою збільшує структурне різноманіття системи. Залежно від співвідношення лінійних часток і дисперсних зерен утворюються кластерні підструктури різної природи, які відрізняються періодами свого формування і властивостями. На нашу думку, різноманітність таких підструктур на мікрорівні бетону дозволить поліпшити структурні параметри в'язучій системі. Для підтвердження зроблених заключень пропонується на часі провести аналіз результатів досліджень зразків-дисків глини (рис. 3), армованих гідрофільною дискретною арматурою. Проведені дослідження показали, що процес структуроутворення глиняних композицій у повітряно-сухих умовах супроводжується значними усадочними деформаціями, які призводять до появи в об'ємі матеріалу тріщин і внутрішніх поверхонь розділу, зміни розмірів й об'єму зразків.

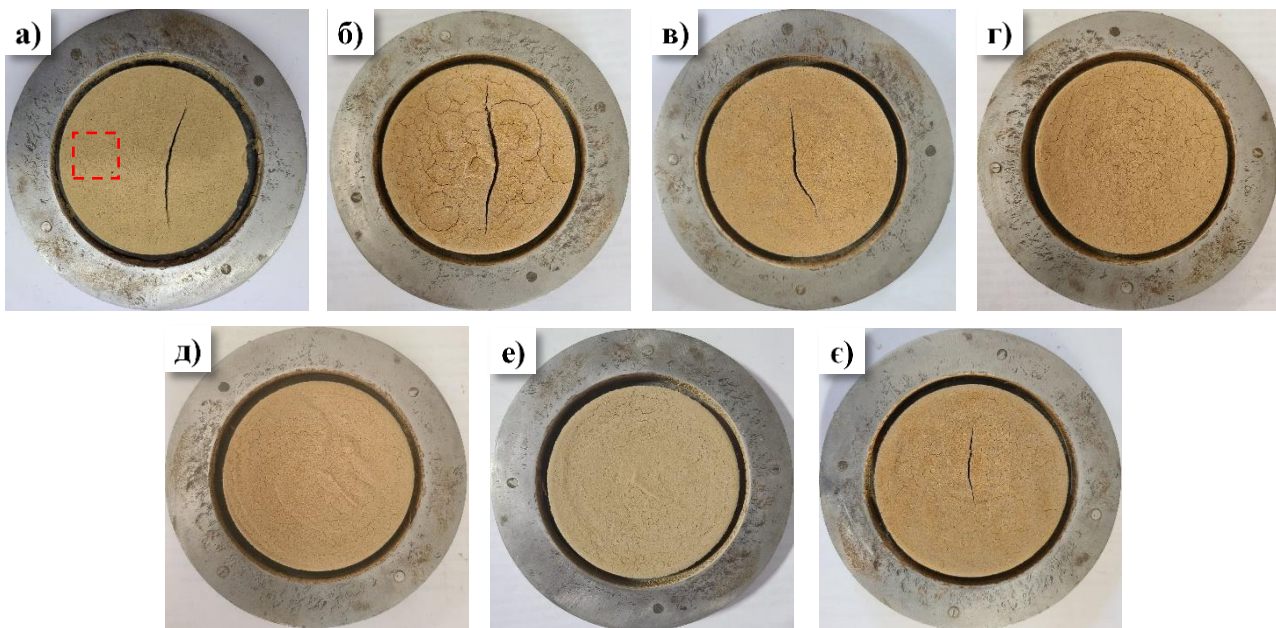


Рис. 3. Зразки різних складів глиняних композицій: без фібри (а); армовані фіброю довжиною 3 мм (б); 6 мм (в); 12 мм (г); 3 і 6 мм (д); 3 і 12 мм (е); 6 і 12 мм (є)

Кількісною мірою прояву усадочних явищ при висиханні зразків глини є величина їх усадки та об'ємної маси. Відносну повітряну усадку ($\epsilon_{в.у}$, %) обчислювали за зміною площі поверхні зразків-дисків $\epsilon_{в.у} = (S_0 - S_1) / S_0$. Аналіз результатів критеріїв показав, що неармований склад (рис. 4 і 5) характеризується найбільшою зміною об'ємної маси (на 34.6%) і величиною усадки (22.4%). Водночас найменші значення цих показників мають склади глини армовані фіброю довжиною 3 і 12 мм. Візуалізація кінетичних кривих об'ємної маси в часі (рис. 4) демонструє, що моделі структур дискретно-армованих композицій #3, #5 і #7 знаходяться в більш напруженому стані в процесі висихання внаслідок більших перепадів вологовмісту протягом 3 діб. Однак, всупереч цьому склади характеризуються меншою пошкодженістю (на $\leq 33.5\%$) порівняно з неармованим складом #1 (рис. 5). В роботі пошкодженість глиняних композицій визначена через коефіцієнт пошкодженості K_D [22], як співвідношення сумарної

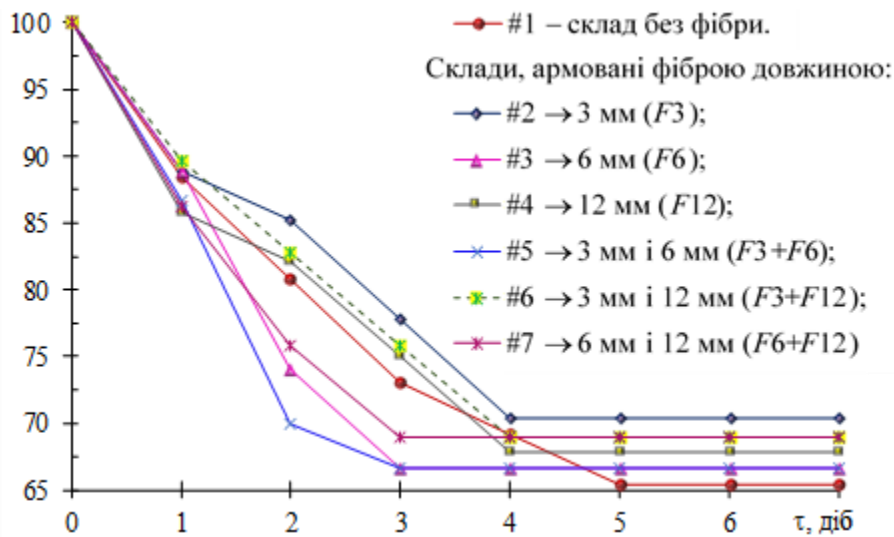
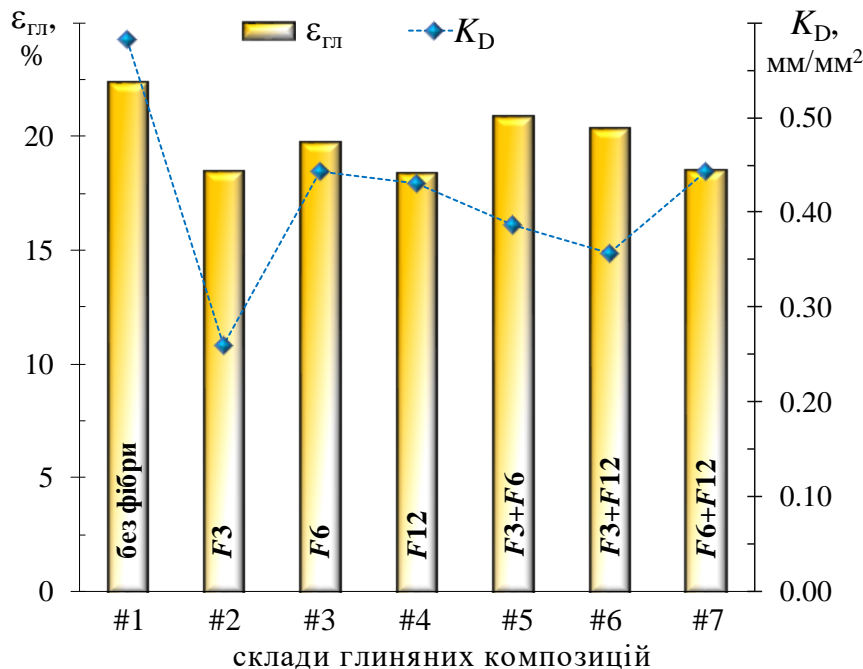


Рис. 4. Кінетика зміни об'ємної маси (%) складів глиняних композицій


 Рис. 5. Аналіз зміни усадки ($\epsilon_{\text{гл}}$) і пошкодженості (K_D) глиняних зразків у віці 7 діб

протяжності тріщин і внутрішніх поверхонь розділу до фіксованої площі поверхні зразка (на рис. 3,а, як приклад, площа поверхні для обчислення K_D позначена штриховою лінією). До того ж на лицьовій поверхні композиції складу #5, який показав дещо більшу величину усадки $\epsilon_{\text{в.у}}$ порівняно з іншими армованими складами глини, не спостерігається утворення макротріщин. Отже, можна стверджувати, що дискретні скловолкна здатні протистояти внутрішнім напруженням шляхом перерозподілу величин усадочних деформацій за перетином (рис. 3) і по поверхні зразків (рис. 6) дисперсної системи. В найбільшій мірі на зниження K_D впливає присутність фібри довжиною 3 мм (склади #2, #5 і #6). Додатково оцінювався коефіцієнт чутливості $K_{\text{ч}}$ глиняних систем до висихання (або тріщиностійкість) [23]. Показник за З.А. Носовою розрахований через об'єм і масу вологих (відформованих) і висушених надалі впродовж 7 днів тих же зразків глини. Аналіз чисельних значень $K_{\text{ч}}$ вказує, що менш чутливими до вилучення вологи є склади в яких присутне дискретне скловолкно. Значення показника більш ніж на 17.4 % нижчий за неармований склад #1. На підставі проведеного дослідження логічно припустити, що структура армованих глиняних композицій пронизана тоншою капілярною сіткою, яка ускладнює переміщення вологи із внутрішньої частини до периферійної й поверхні зразків-дисків під час їх висихання. На початковому етапі

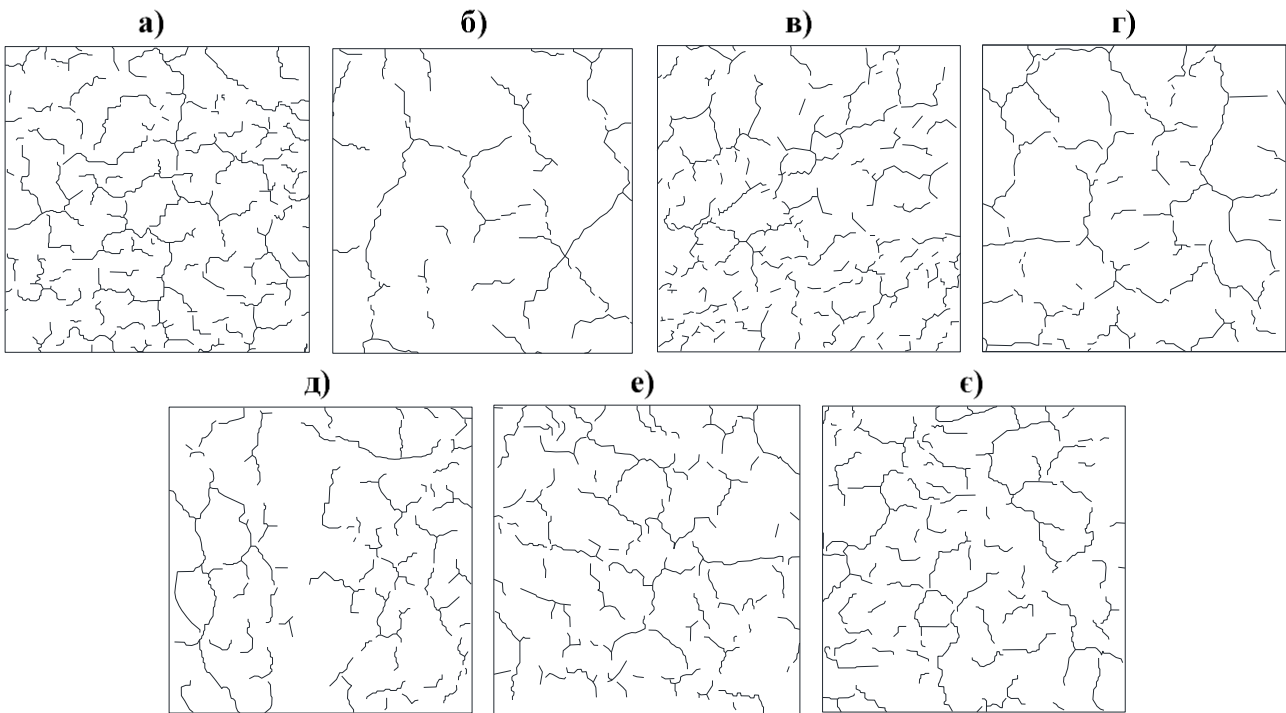


Рис. 6. Тріщини і внутрішні поверхні розділу глиняних зразків: без фібри (а); армовані фіброю довжиною 3 мм (б); 6 мм (в); 12 мм (г); 3 і 6 мм (д); 3 і 12 мм (е); 6 і 12 мм (е)

становлення структури в'язучого з фіброю утворюються кластерні підструктури із щільнішою упаковкою високодисперсних часток глини та з поліпшеними адгезійно-когезійними зв'язками між агрегатами. Візуальний і кількісний аналіз проявлених дефектів на лицьовій поверхні зразків-дисків підтверджує, що сформовані структурні блоки є дещо більшими за розміром (рис. 6, б та е), а інтегральна структура композицій із фіброю характеризуються меншою пошкодженістю K_D (рис. 5). Проте, як відомо, покращення функціональних властивостей армованих композитів значною мірою залежить від ступеня розподілу (або дисперсності) дискретної арматури в об'ємі матеріалу. На наш погляд, розташування дефектів на поверхні глиняних систем повинне хоча б побічно відображати – чи здатні лінійні частки до рівномірного розподілу об'ємних деформацій і диспергування в структурі композитів. З рис. 6, б-е видно, що для ефективного армування структури в'язучих систем необхідно враховувати не лише співрозмірність за діаметром часток дисперсної фази, але й довжину лінійних часток. Найбільш однорідними за ступенем дисперсності моноволокон є склади глини армовані фіброю довжинами 3 і 12 мм. Крім того, ці композиції характеризуються оптимальними рівнями властивостей. У зв'язку з цим в роботі розглянуто кореляційний зв'язок між структурними параметрами глиняних систем. Через коефіцієнт кореляції r , встановлено тісний взаємозв'язок між критеріями $r\{K_{ч};\varepsilon_{в.у}\}=0.85$, $r\{K_{ч};\rho_{гн}\}=-0.86$, $r\{K_{ч};K_D\}=0.73$, що підтверджує правдивість отриманих результатів.

Отримані результати на фізичних моделях глини дозволили переконатися, що дискретні моноволокна здатні активно брати участь в організації структурних агрегатів різної природи. Здійснений аналіз властивостей різних складів глиняної композиції доводить, що різноманітність кластерних підструктур надає можливість поліпшити структурні параметри в'язучій системі. Дослідження дисперсних систем показали, що величина об'ємних деформацій визначається початковим складом глини. В нашому випадку – це якісним складом лінійних часток різної довжини стосовно неармованого складу глини. Використання фібри оптимальної геометрії в глиняних композиціях забезпечує отримання структур зі значно меншою кількістю дефектів (підтверджується коефіцієнтом пошкодженості, величиною усадки тощо). З огляду на отримані результати можна вважати, що характер розподілу деформацій в структурі матеріалу є різним.

Для неспростовного доказу того, що лінійні частки спроможні до сприйняття і перерозподілу деформацій, на прикладі виготовлених фізичних моделей розглянуто розподіл залишкових технологічних напружень (деформацій) в оптично-чутливому полімері. В роботі до залишкових віднесено такі деформації, які виникли й розвивалися на рівні зразка-диска під час реакції поліконденсації та отвердіння епоксидного композиту. Застосування оптично-прозорого полімеру дозволяє оцінити напружено-деформований стан зразка дискретно-армованого композиту. Розподілення деформацій або наявність технологічних напружень в структурі моделей виявлено методом фотопружності під час просвічування зразків-дисків (рис. 7) поляризованим світлом [24]. При цьому, інтерференційні картини світлових хвиль (або картини смуг чи ізохром), що виходять із досліджуваних зразків композиту, отримані за допомогою фотопристрою при однакових кутах нахилу і відстанях розташування поляроїда й аналізатора між собою, та відповідно зразка між ними.

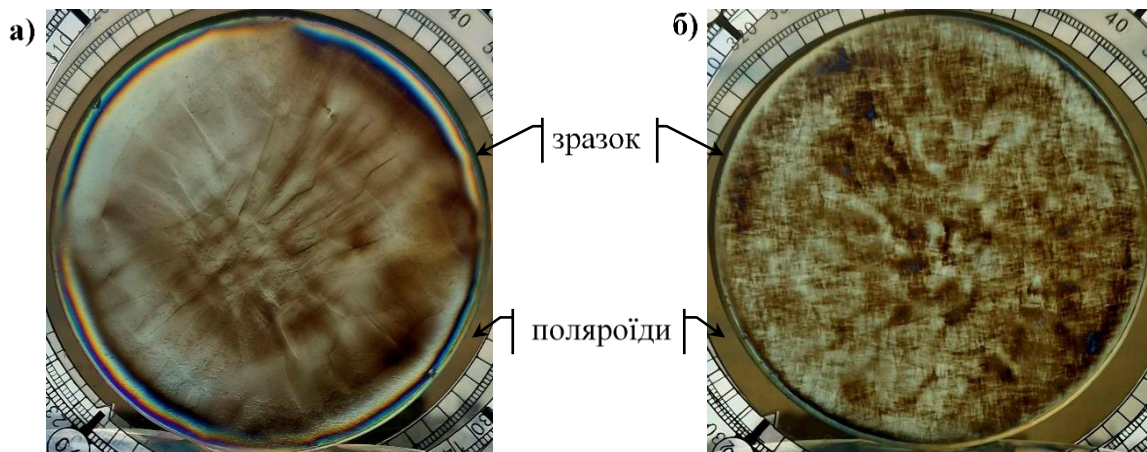


Рис. 7. Характер розподілу залишкових деформацій в структурі неармованої (а) та армованої фіброю (б) полімерних систем

Візуальний аналіз картин смуг (рис. 7) двох моделей демонструє, що неармований склад порівняно з армованим характеризується дещо більшим градієнтом нерівномірності полів напружень в об'ємі композиту. При тому барвисті смуги інтенсивних напружень максимально проявляються в поверхневих шарах матеріалу, на гранях по периметру зразка без фібри (рис. 7, а). Через це можна вважати, що периферійні шари неармованого зразка матеріалу є найбільш піддатливими до початкового утворення в них дефектів. Своєю чергою незброєним оком видно, що в структурі дискретно-армованого зразка (рис. 7, б) спостерігається відносно однорідна картина перерозподілення залишкових полів напружень. Наявність фібри змінює характер розподілу об'ємних деформацій, що виникають при твердінні зв'язуючого, та забезпечує через хорошу дисперсність в структурі композиту більш рівномірне розсіювання внутрішньої енергії в'язучої системи в об'ємі зразка, запобігаючи тим самим передчасному утворенню технологічних дефектів. Це підтверджує здатність дискретних волокон приймати участь в процесах структуроутворення будівельних композитів.

Висновок. Застосування різних фізичних моделей дисперсних систем дозволило показати активну участь дискретної арматури в процесах структуроутворення дисперсних композитів. Наповнення кластерних структур лінійними частками збільшує структурне різноманіття дисперсної системи. Аналіз властивостей різних складів армованої композиції доводить, що різноманітність кластерних підструктур надає можливість поліпшити структурні параметри в'язучій системі. Використання фібри певної геометрії забезпечує отримання структур композитів із меншою кількістю дефектів, адже лінійні частки спроможні до сприйняття і перерозподілу об'ємних деформацій. В наступній публікації планується представити аналіз експериментальних досліджень властивостей цементного каменю, наповненого органо-мінеральними добавками різної природи.

Література

1. Соломатов В.И., Тахиров М.К., Тахер Шах Мд. Интенсивная технология бетонов. Москва: Стройиздат, 1989. 264с.
2. Соломатов В.И., Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Сиренко А.В. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости. Київ: Будівельник, 1991. 144с.
3. Суханов В.Г., Вировой В.М., Коробко О.А. Структура матеріалу у структурі конструкції: монографія. Одеса: ОДАБА, 2022. 412с.
4. Вировой В.М., Коробко О.О., Суханова С.С., Суханов В.Г. Наукові дослідження: основи методології. Одеса: ОДАБА, 2024. 148с.
5. Garboczi E.J., Bentz D.P. Digital simulation of the aggregate–cement paste interfacial zone in concrete. *Journal of Materials Research*. 1991. vol. 6. no. 1, pp. 196-201.
6. Ramachandran V.S., Beaudoin James J. *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. William Andrew Publishing, LLC Norwich, New York, USA, 2001.
7. Mehta P., Paulo J. M. Monteiro. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 3th edition. McGraw Hill Professional, 2006.
8. Дворкин Л.И., Соломатов В.Н., Выровой В.Н., Чудновский С.М. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. Киев: Будівельник, 1991.
9. Химические и минеральные добавки в бетон / под ред. А.В. Ушерова-Маршака. Харьков: Колорит, 2005. 280с.
10. Rixom M.R., Mailvaganam Noel P. *Chemical admixtures for concrete*. 3th edition. Taylor & Francis e-Library, 2001.
11. Троян В.В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів: навчальний посібник. Ніжин: ТОВ «Видавництво «АспектПоліграф», 2010. 228с.
12. Пушкарьова К.К., Гончар О.А., Мазур В.О. Особливості структуроутворення білого портландцементу в присутності карбонатних добавок *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2023. С. 57-69.
13. Bentur A., Mindess S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. 2th edition. London-New York: Taylor & Francis, 2007.
14. Brand A.M. *Cement-Based Composites: Materials, mechanical properties and performance*. 2th edition. London-New York: Taylor & Francis, 2009.
15. Lee S.F., Jacobsen S. Study of interfacial microstructure, fracture energy, compressive energy and debonding load of steel fiber-reinforced mortar. *Materials and Structures*, 2011. vol. 44. pp. 1451-1465.
16. Bantia N., Majdzadeh F., Wu J., Bindiganavile V. Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. *Cement & Concrete Composites*, 2014. vol. 48, pp. 91-97.
17. Dovgan A.D., Vyrovoy V.M., Dovgan P.M. Crack resistance of decorative composites. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. vol. 708. pp. 1-7
18. Maso J.C. *Interfacial Transition Zone in Concrete*. An Imprint of Chapman & Hall, 1996.
19. Chung D.D.L. Dispersion of Short Fibers in Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2005. pp. 379-383.
20. Katz A., Bentur A. Mechanisms and processes leading to changes in time in the properties of carbon fiber reinforced cement. *Advanced Cement Based Materials*, 1996. vol. 3, pp. 1-13.
21. Dovgan A.D., Vyrovoy V.M. Structure formation of dispersed-reinforced building composites. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2021, no. 85, pp. 71-78.
22. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. Одесса: Город мастеров, 1998. 168с.
23. Юшкевич М.О., Роговой М.И. Технология керамики. Москва: Стройиздат, 1969. 350с.

24. Стрижало В.О., Бородій М.В. Експериментальні методи в механіці деформівного твердого тіла. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 306с.

References

- [1] V.Y. Solomatov, M.K. Takhyrov, Md. Takher Shakh, *Yntensyvnaia tekhnolohyia betonov*. Moskva: Stroiyzdat, 1989. 264s.
- [2] V.Y. Solomatov, V.N. Выговой, V.S. Dorofeev, A.V. Syrenko, *Компрозытуопные стroytelные материалы у конструктыу понyзhenной материалоemкости*. Kiev: Budivelnyk, 1991.
- [3] V.H. Sukhanov, V.M. Vyrovoy, O.A. Korobko, *Struktura materiala v strukturi konstruksii: monohrafiia*. Odesa: ODABA, 2022.
- [4] V.M. Vyrovoy, O.O. Korobko, S.S. Sukhanova, V.H. Sukhanov, *Naukovi doslidzhennia: osnovy metodolohii*. Odesa: ODABA, 2024.
- [5] E.J. Garboczi, D.P. Bentz, "Digital simulation of the aggregate–cement paste interfacial zone in concrete", *Journal of Materials Research*, vol. 6. no. 1, pp. 196-201, 1991.
- [6] V.S. Ramachandran, James J. Beaudoin, *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. William Andrew Publishing, LLC Norwich, New York, USA, 2001.
- [7] P. Mehta, J. M. Monteiro Paulo, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 3th edition. McGraw Hill Professional, 2006.
- [8] L.Y. Dvorkyn, V.N. Solomatov, V.N. Выговой, S.M. Chudnovskiy Тseментные бетоны с мyнеральнымy napolnyteliamy. Kyev: Budyвeлник, 1991.
- [9] A.V. Usherova-Marshaka, *Khymycheskye y mуneralnue dobavky v beton*. Kharkov: Koloryt, 2005.
- [10] M.R. Rixom, Noel P. Mailvaganam, *Chemical admixtures for concrete*. 3th edition. Taylor & Francis e-Library, 2001.
- [11] V.V. Troian, *Dobavky dlia betoniv i budivelnykh rozchyniv: navchalnyi posibnyk*. Nizhyn: TOV «Vydavnytstvo «AspektPolihraf», 2010.
- [12] K.K. Pushkarova, O.A. Honchar, V.O. Mazur, "Osoblyvosti strukturoutvorennia biloho portlandtseментu v prysutnosti karbonatnykh dobavok", *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy*, pp. 57-69, 2023.
- [13] A. Bentur, S. Mindess, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. 2th edition. London-New York: Taylor & Francis, 2007.
- [14] A.M. Brand *Cement-Based Composites: Materials, mechanical properties and performance*. 2th edition. London-New York: Taylor & Francis, 2009.
- [15] S.F. Lee, S. Jacobsen, "Study of interfacial microstructure, fracture energy, compressive energy and debonding load of steel fiber-reinforced mortar", *Materials and Structures*, vol. 44, pp. 1451-1465, 2011.
- [16] N. Banthia, F. Majdzaдeh, J. Wu, V. Bindiganavile, "Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear", *Cement & Concrete Composites*, vol. 48, pp. 91-97, 2014.
- [17] A.D. Dovgan, V.M. Vyrovoy, P.M. Dovgan, "Crack resistance of decorative composites", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 708, pp. 1-7, 2019.
- [18] J.C. Maso, *Interfacial Transition Zone in Concrete*. An Imprint of Chapman & Hall, 1996.
- [19] D.D.L. Chung, "Dispersion of Short Fibers in Cement", *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 379-383, 2005.
- [20] A. Katz, A. Bentur, "Mechanisms and processes leading to changes in time in the properties of carbon fiber reinforced cement", *Advanced Cement Based Materials*, vol. 3, pp. 1-13, 1996.

- [21] A.D. Dovgan, V.M. Vyrovoy, "Structure formation of dispersed-reinforced building composites", *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, no. 85, pp. 71-78, 2021.
- [22] V.S. Dorofeev, V.N. Vyrovoy, *Tekhnolohycheskaia povrezhdennost stroitelnykh materiyalov y konstruktsyi*. Odessa: Horod masterov, 1998.
- [23] M.O. Yushkevych, M.Y. Rohovoi, *Tekhnolohyia keramyky*. Moskva: Stroiyzdat, 1969.
- [24] V.O. Stryzhalo, M.V. Borodii, *Eksperymentalni metody v mekhanitsi deformivnoho tverdoho tila*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022.

ROLE OF DISCRETE REINFORCEMENT IN THE ORGANIZATION OF THE MICROSTRUCTURE OF DECORATIVE COMPOSITES

¹**Dovgan O.D.**, PhD, Associate Professor,
aleks.dovhan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6140-3159

¹**Vyrovoy V.M.**, D.Sc., Professor,
vyrovoy@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8818-4112

¹**Dovgan P.M.**, PhD,
dovganpm@gmail.com, ORCID: 0009-0002-3603-7617

¹**Makarova S.V.**, PhD, Associate Professor,
svetlana.makarova@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3237-1431

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
4, Didrikhson str., Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. The article proposes to consider decorative materials and products in the form of open difficult organized systems that interact with the environment permanently and react to the totality of external influences. It is proposed to apply a multi-level discrete reinforcement of material structures of products in order to maintain functional properties at a given level. Discrete reinforcement as an initial component is able to participate in the processes of structure formation at all levels of structural heterogeneity of decorative composite. A mechanism of microstructure organization of dispersed-reinforced material was studied on various models of different dispersed systems. Experimental studies were conducted in several stages. At the first stage, models of physical interaction of particles of dispersed phase on the surface of the dispersion model were used. At the second stage, physical models of clay-water and polymer-containing systems were used to assess the degree of fiber dispersion and analyze the kinetics of cluster substructures formation of a microstructure of reinforced composites.

The analysis of models of interparticle interactions made it possible to identify that a filling of cluster structures with discrete reinforcement increases a structural diversity of the system. Cluster substructures of different nature are formed depending on the ratio of linear particles and dispersed grains. Analysis of the properties of different compositions of the clay composition proves that the diversity of cluster substructures provides an opportunity to improve structural parameters of the dispersed system. Studies have shown that a value of volumetric deformations is determined by the initial composition of the clay. The use of fiber of an optimal geometry in the compositions provides structures with significantly fewer defects. The distribution of residual stresses and deformations in an optically sensitive polymer is considered on the example of manufactured physical models, providing an irrefutable proof that linear particles are capable of perception and redistribution of deformations. Visual analysis isochrome of polymer samples demonstrated that the presence of fiber in the composite changes the nature of distribution of volumetric deformations.

Keywords: decorative composite, structure, fiber, dispersed system, cluster, deformations.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2024

THE EFFECT OF PARTIAL REPLACEMENT OF CEMENT WITH FLY ASH ON THE STRENGTH OF CONCRETE FOR TRANSPORTATION STRUCTURES AND ROAD PAVEMENTS

¹**Kroviakov S.O.**, Doctor of Engineering, Professor,
skrovyakov@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0800-0123

¹**Shymchenko P.V.**
1210867@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1656-9432

¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
4, Didrichson str., Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. The effect of replacing part of the cement with fly ash on the strength of concrete for transportation structures and road pavements has been determined.

Portland cement CEM II/A-S 500, crushed stone (5–20 mm fraction), quartz sand with fineness modulus of 2.3, the superplasticizer Polyplast SP-1, and fly ash from the Darnytsia Thermal Power Plant were used in concrete production. The properties of three concrete compositions were investigated. Composition No. 1 (without fly ash) served as the control, with 300 kg/m³ of Portland cement used as the binder. In composition No. 2, 10% of the Portland cement was replaced with 75 kg/m³ of fly ash. In composition No. 3, 20% of the Portland cement was replaced with 150 kg/m³ of fly ash. All concrete compositions included 2.4 kg/m³ of superplasticizer.

All concrete mixtures exhibited equal workability (S1), with the water/cement ratio (W/C) depending on the composition. For the control composition No. 1, the W/C ratio was 0.390. For composition No. 2, the actual W/C ratio, calculated as the total binder content (cement and fly ash), was 0.333. For composition No. 3, the W/C ratio was 0.308. Thus, as the proportion of fly ash in the binder increased, the W/C ratio of the mixtures decreased.

The average density of the control concrete (composition No. 1) and composition No. 2 was approximately equal (2441 kg/m³ and 2446 kg/m³, respectively), while composition No. 3 exhibited a slightly lower density (2423 kg/m³). This can be explained by the fact that replacing part of the cement with a larger mass of fly ash reduces the W/C ratio while simultaneously increasing the spacing of coarse aggregates.

Compressive strength was measured at 7 and 28 days. At 7 days, the compressive strength of composition No. 2, where 30 kg/m³ of cement was replaced with 75 kg/m³ of fly ash, was 6.8% lower than that of the control (composition No. 1). However, at 28 days, the compressive strength of composition No. 2 was 3.8% higher than that of the control. For composition No. 3, replacing 60 kg/m³ of cement with 150 kg/m³ of fly ash resulted in a 28.3% decrease in compressive strength at 7 days and a 14.0% decrease at 28 days compared to the control. Thus, concretes containing fly ash demonstrated slower strength gain compared to concrete using only Portland cement as the binder. Replacing 10% of the Portland cement with a rational amount of fly ash produced concrete with strength comparable to that of the control composition. However, replacing 20% of the Portland cement was not fully compensated by the fly ash.

Therefore, the use of fly ash in concrete for transportation structures and road pavements is both feasible and effective. The introduction of a rational amount of fly ash reduces binder consumption, which has significant ecological benefits and is economically viable.

Keywords: fly ash, concrete, transportation structures, rigid pavement, superplasticizer, strength.

Introduction. A global trend today is the gradual increase in road construction, particularly with rigid pavements. Road construction requires significant quantities of cement concrete for the construction of various types of transportation structures and, in the case of rigid pavements,

directly for pavement layers. In Ukraine, as a result of the full-scale invasion, a substantial portion of the transportation infrastructure has been damaged and requires restoration, which will necessitate extensive use of concrete. During the post-war recovery phase, the volume of concrete works in transportation construction is expected to increase further.

One of the strategic goals of sustainable development, as outlined in the UN Framework Convention on Climate Change, is to implement measures to reduce carbon dioxide emissions. The cement industry is a significant producer of CO₂, making the use of industrial by-products in concrete, capable of replacing part of the cement, along with efficient modifiers, a key aspect of Ukraine's low-carbon development as a European state [1].

An effective secondary material that reduces binder consumption in concrete is fly ash, a by-product of thermal power plants. Thus, the use of fly ash is both environmentally beneficial, due to reduced CO₂ emissions, and economically advantageous [2, 3]. However, in Ukraine, fly ash is rarely used in concretes for transportation structures, and even less so for road pavements. This is due to the specific performance requirements for such concretes on the one hand and the limited experience in using this by-product in transportation construction on the other. Therefore, research into the feasibility of partially replacing cement with fly ash in concretes for transportation structures and road pavements, while ensuring the necessary levels of strength and durability, remains relevant.

Analysis of Research and Publications. Fly ash is a fine-grained product formed from the mineral components of fuel during combustion and collected in specialized filters [3, 4]. Ukraine has a well-developed network of thermal energy plants that produce significant amounts of by-products, including fly ash [5, 6]. The predominant component of fly ash is a vitreous aluminosilicate phase, which consists of spherical particles with hydraulic activity [4]. Thus, fly ash serves as an active mineral admixture that increases the total binder content in concrete. Simultaneously, fly ash acts as a microfiller, influencing the physicochemical processes at the interface between the cement paste and aggregate [7]. Its use reduces the amount of calcium hydroxide formed during the hydration of the binder, thereby improving the corrosion resistance of concrete [2, 7, 8].

In concrete production, fly ash is used either to partially replace cement [4, 7-10] or as a pozzolanic additive [2, 7, 10-12]. Researchers have often determined that replacing approximately 15-20% of the cement mass with fly ash is effective [3, 10]. However, under certain conditions, even greater amounts of binder can be replaced without compromising material properties. For instance, in [9], 80% of the cement in self-compacting concrete was replaced with a combination of industrial by-products, including fly ash, silica fume, and ground granulated blast furnace slag, without reducing compressive strength. This replacement also decreased the concrete's permeability to chloride ions. A similar effect of reduced permeability was observed in studies [11, 12]. In [2], the use of fly ash combined with silica fume and zeolite improved the quality of composite cements and accelerated the concrete production process. Importantly, unlike other pozzolanic additives (such as zeolite or silica fume), fly ash does not require increased dosages of superplasticizer to maintain mix workability. In [12], the fly ash content in concrete ranged from 30% to 40% of the total binder content, with concrete strength ranging from 65 MPa to 85 MPa. Concrete samples with fly ash also exhibited reduced shrinkage compared to control samples. In [13], the incorporation of fly ash enhanced the strength and durability of road pavement concretes, with the maximum effect achieved when fly ash was used in combination with silica fume.

However, when using fly ash to replace part of the cement, it is important to consider that its impact on concrete properties varies depending on the type of cement, the percentage of binder replaced, and the curing conditions [14]. The composition and structure of fly ash are also non-uniform and depend on many factors, including the type of fuel burned, its ash content, and fineness of grinding, combustion temperature, and the residence time of particles in the combustion zone [6].

In the practice of road construction in Ukraine, fly ash is primarily used to stabilize subgrade layers [15], particularly to improve the properties of soil-cement [16]. The Ukrainian standard SOU 42.1-37641918-104:2013, "Fly Ash and Ash-Slag Mixtures from Thermal Power Plants for Road

Works. Technical Specifications," permits the use of fly ash in preparing cement concrete mixes for rigid pavement structures, as well as for concrete products for bridges and culverts [17]. Additionally, [18] highlights the potential for using fly ash in road and airfield construction, particularly in prestressed slabs and monolithic cement concrete pavements.

Therefore, given the available raw material base and the urgent needs of Ukraine's economy, research aimed at improving the efficiency of fly ash use in transportation construction is highly relevant.

The objective of this study is to determine the effect of replacing part of the cement with fly ash on the early-age and design strength of concrete for transportation structures and road pavements.

Materials and Methods. The following materials were used in the experiment for concrete production:

- Portland cement CEM II/A-S 500, manufactured by PJSC Dyckerhoff Cement Ukraine.
- Crushed stone (fraction 5–20 mm) sourced from the Novyi Buh district, Mykolaiv region.
- Quartz sand with a fineness modulus of 2.3, sourced from the Voznesensk district, Mykolaiv region.
- Superplasticizer Polyplast SP-1.
- Fly ash from the Darnytsia Thermal Power Plant (Kyiv).

The properties of three concrete compositions for transportation structures and road pavements were investigated. Composition No. 1 (without fly ash) served as the control, where only Portland cement was used as the binder in the amount of 300 kg/m³. In composition No. 2, 10% of the Portland cement was replaced with 75 kg/m³ of fly ash. In composition No. 3, 20% of the Portland cement was replaced with 150 kg/m³ of fly ash. All mixes included a superplasticizer in the amount of 2.4 kg/m³, which constituted 0.8% of the cement mass in the control composition No. 1. The dosage of superplasticizer remained unchanged when a larger mass of fly ash replaced part of the cement.

All concrete mixes exhibited equal workability, classified as S1, with a slump of 3–4 cm. This corresponds to the requirements of DBN V.2.3-4:2015 "Automobile Roads" [19] for mix workability when using slipform pavers (1–5 cm, depending on the paving speed). Additionally, mixes with this level of workability can be used for producing components of transportation structures. The workability of all concrete mixes was achieved by adjusting the water content with corresponding corrections to the mix design. The compositions of the investigated concretes are presented in Table 1.

Table 1 – Compositions of the Investigated Concretes

No. of composition	Concrete composition, kg/m ³					
	Cement	Fly Ash	Crushed Stone	Sand	Superplasticizer	Water
1	300	-	1275	775	2.4	117
2	270	75	1270	735		115
3	240	150	1265	690		120

The workability of the concrete mixtures was determined in accordance with DSTU B V.2.7-114:2002 "Building Materials. Concrete Mixtures. Test Methods" [20]. The compressive strength of the concretes was measured according to DSTU B V.2.7-214:2009 "Building Materials. Concretes. Methods for Determining Strength Using Control Samples" [21].

Results of the Study. Since all concrete mixtures exhibited equal workability, their water-to-cement ratio (W/C) depended on the composition. For the control composition (No. 1), the W/C ratio was 0.390. For composition No. 2, the actual W/C ratio—calculated as the sum of cement (270 kg/m³) and fly ash (75 kg/m³) – was 0.333. For composition No. 3, the W/C ratio, based on the

total binder content (cement 240 kg/m³ + fly ash 150 kg/m³), was 0.308. This calculation can be considered methodologically correct since fly ash has a particle size distribution similar to that of cement.

The gradual decrease in the W/C ratio as the proportion of fly ash in the binder increased confirms a well-known materials science principle that this mineral admixture improves the workability of the concrete mixture [10, 11]. In this experiment, the reduction in the W/C ratio was also partly due to the fact that the total amount of binder (cement + fly ash) in composition No. 2 was 45 kg/m³ greater than in composition No. 1, and in composition No. 3, it was 90 kg/m³ greater than in composition No. 1. However, despite the increase in total binder content, the amount of superplasticizer remained unchanged. Consequently, the actual dosage of the superplasticizer for composition No. 1 was 0.8% of the binder mass, for composition No. 2 – 0.696%, and for composition No. 3 – 0.615%.

The experimentally determined values of average density and compressive strength of the investigated concretes are presented in Table 2.

Table 2 – Average Density and Compressive Strength of the Investigated Concretes

No. of composition	Average Density, kg/m ³	Compressive Strength at 7 Days, MPa	Compressive Strength at 28 Days, MPa
1	2441	57.0	65.5
2	2446	53.2	68.0
3	2423	40.9	56.3

The analysis of the experimental data presented in Table 2 shows that the average density of the control concrete (No. 1) and composition No. 2 was approximately equal, while composition No. 3 had a slightly lower density. This can be explained by the fact that replacing part of the cement with a larger mass of fly ash reduces the W/C ratio of the mixture, but at the same time, increases the spacing of the coarse aggregate.

Figure 1 presents a diagram based on the data from Table 1, showing the compressive strength development of the investigated concretes at 7 and 28 days.

The analysis of the diagram and Table 1 data shows that at 7 days, the compressive strength of composition No. 2, where 10% of cement (30 kg/m³) was replaced with 75 kg/m³ of fly ash, was only 6.8% lower than that of the control composition No. 1. At 28 days, however, the compressive strength of composition No. 2 was 3.8% higher than that of the control composition. For composition No. 3, replacing 20% of cement (60 kg/m³) with 150 kg/m³ of fly ash resulted in a 28.3% reduction in compressive strength at 7 days. By 28 days, composition No. 3 exhibited a compressive strength that was 14.0% lower than that of the control composition.

Thus, concretes incorporating fly ash demonstrated a slower rate of strength development compared to the control concrete, where only Portland cement was used as the binder. This finding is consistent with results reported by many researchers [3, 4, 10, 22]. Within the scope of this experiment, replacing 10% of the Portland cement with an optimal amount of fly ash, as a by-product of thermal power plants, produced concrete with strength comparable to the control composition. However, replacing 20% of the Portland cement (60 kg/m³) with 150 kg/m³ of fly ash was not fully compensated, which can be attributed to the limited pozzolanic effect of this admixture and possibly the specific quality of the fly ash used from the Darnytsia Thermal Power Plant. It is also important to note that this result was obtained for concretes based on CEM II/A-S 500 cement, which contains up to 20% ground granulated blast furnace slag. The effectiveness of fly ash will naturally vary when using other types of cement.

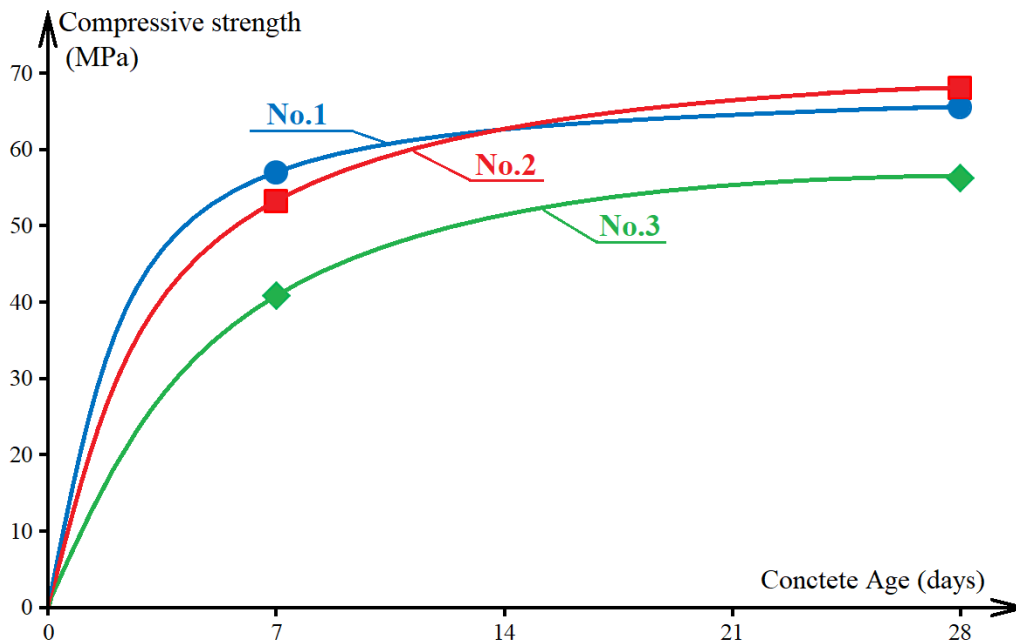


Fig. 1. Compressive strength development of the investigated concretes at 7 and 28 days: No. 1 – 300 kg/m³ of cement, no fly ash; No. 2 – 270 kg/m³ of cement, 75 kg/m³ of fly ash; No. 3 – 240 kg/m³ of cement, 150 kg/m³ of fly ash

Conclusions and Prospects for Further Research. Fly ash can be effectively used in concrete for transportation structures, including culverts, and road pavements, enabling a reduction in binder consumption. When using Portland cement CEM II/A-S 500, it is possible to replace 30 kg/m³ of binder with 75 kg/m³ of fly ash from the Darnytsia Thermal Power Plant without compromising the material's strength. The concrete compositions developed in this study, based on their compressive strength, can be used for the construction of rigid road pavements of all categories. For culverts, enhancing the concrete's corrosion resistance is potentially significant, which, according to many studies, can be achieved by using an optimal amount of fly ash.

Expanding the range of concretes in which fly ash, as a by-product of thermal power plants, can be utilized has important environmental benefits in terms of reducing carbon dioxide emissions, as well as being economically viable.

Further research will investigate the effect of fly ash from the Darnytsia Thermal Power Plant on the strength and durability of concretes modified with polycarboxylate additives. In particular, future studies will focus on the impact of partial replacement of Portland cement with fly ash on such critical quality parameters for concretes used in transportation structures and road pavements as frost resistance and abrasion resistance.

References

- [1] M.A. Sanytsky, T.P. Kropyvnytska, H.S. Ivashchyshyn, B.H. Rusyn, "Kontseptsiya nyz'kovuhletsevoho rozvytku v tsementniy promyslovosti", *Building materials and products*, 5-6, pp. 24-27, 2017.
- [2] M. Sanytsky, T. Kropyvnytska, H. Ivashchyshyn, "Sustainable modified pozzolanic supplementary cementitious materials based on natural zeolite, fly ash and silica fume", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254, 012004, 2023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012004>
- [3] D. Nayak, P.P. Abhilash, R. Singh, R. Kumar, V. Kumar, "Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies", *Cleaner Materials*, 6, 100143, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100143>
- [4] L.Y. Dvorkin, A.V. Myronenko, *Budiveln'i materialy ta vyroby iz zastosovuvannyam promyslovykh vidkhodiv*. Rivne: NUVHP, 2019.

- [5] L.O. Bohins'ka, "Vykorystannya vidkhodiv vyrobnytstv u budivnytstvi", *Novi tekhnolohiyi v budivnytstvi*, pp. 35-42, 2021. <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2021.39.5>
- [6] V.P. Kovalskyy, V.O. Tymoshenko, "Doslidzhennya perspektyvy vykorystannya zoly vynosu v budivnytstvi", *Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi*, 34(1), pp. 36-42, 2023. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-1-36-42>
- [7] L.Y. Dvorkin, V.V. Zhitkovsky, V.V. Marchuk, Yu.O. Stepasyuk, M.M. Skrypnyk, *Efektivni tekhnolohiyi betoniv ta rozchyniv iz zastosuvannyam tekhnohennoyi syrovyny*. Rivne: NUVHP, 2017.
- [8] O.V. Stepanchuk, Ya. Shilin, "Application of fly ash in concrete production: an integrated study of environmental benefits and material properties", *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, 1(3), pp. 85-95, 2024. <https://doi.org/10.32782/apcmj.2024.3.12>
- [9] O. Mohamed, "Durability and compressive strength of high cement replacement ratio self-consolidating concrete", *Buildings*, 8(11), 153, 2018. <https://doi.org/10.3390/buildings8110153>
- [10] L.Y. Dvorkin, *Efektivni zolovmisni tsementy, betony ta rozchyny*. Rivne: NUVHP, 2022.
- [11] F.A. Sabet, N.A. Libre, M. Shekarchi, "Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash", *Construction and Building Materials*, 44, pp. 175-184, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.069>
- [12] P. Nath, P. Sarker, "Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete", *Procedia Engineering*, 4, pp. 1149-1156, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.144>
- [13] H. Bilal, X. Gao, L. Cavaleri, A. Khan, M. Ren, "Mechanical, durability, and microstructure characterization of pervious concrete incorporating polypropylene fibers and fly ash/silica fume", *Journal of Composites Science*, 8(11), 456, 2024. <https://doi.org/10.3390/jcs8110456>
- [14] M.L. Zeggar, N. Azline, N.A. Safiee, "Fly ash as supplementary material in concrete: A review", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 357, 012025, 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/357/1/012025>
- [15] V.V. Hrabovchak, A.I. Kushtym, B.I. Kudryavets', "Palyvni zoly i shlaky, yak osnovna syrovyna dlya vyrobnytstva tsementiv i betoniv na yikh osnovi", *Problemy rozvytku mis'koho seredovyscha*, 1(20), pp. 32-38, 2018.
- [16] O.V. Mykhaylovs'ka, V.P. Bulhakov, "Doslidzhennya vplyvu zoly vynesennya na mitsnist' hruntotsementu", *Grail of Science*, 17, pp. 210-212, 2022. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.22.07.2022.038>
- [17] SOU 42.1-37641918-104:2013. Zoly-vynosu ta sumishi zoloshlakovi teplovykh elektrostantsiy dlya dorozhnikh robot. Tekhnichni umovy. Kyiv, 2013.
- [18] O.V. Stepanchuk, Shilin Yang, "Application of fly ash in concrete production: an integrated study of environmental benefits and material properties", *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal Issue*, 1(3), pp. 85-95, 2024. <https://doi.org/10.32782/apcmj.2024.3.12>
- [19] DBN V.2.3-4:2015. Avtomobil'ni dorohy. Sporudy transportu. Chastyna I. Proektuvannya. Chastyna II. Budivnytstvo. Kyiv, 2015.
- [20] DSTU B V.2.7-114-2002. Budivel'ni materialy. Sumishi betonni. Metody vyprobuvan. Kyiv, 2002.
- [21] DSTU B V.2.7-214:2009. Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrol'nyy zrazkamy. Kyiv, 2010.
- [22] K. Konieczna, K. Chilmon, W. Jackiewicz-Rek, "Investigation of mechanical properties, durability and microstructure of low-clinker high-performance concretes incorporating ground granulated blast furnace slag, siliceous fly ash and silica fume", *Applied Sciences*, 11, 830, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11020830>

ВПЛИВ ЗАМІНИ ЧАСТИНИ ЦЕМЕНТУ ЗОЛОЮ-ВИНЕСЕННЯМ НА МІЦНІСТЬ БЕТОНІВ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД І ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ

¹**Кровяков С.О.**, д.т.н., професор,
skrovyakov@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0800-0123

¹**Шимченко П.В.**
1210867@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1656-9432

¹*Одеська державна академія будівництва та архітектури*
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. Визначено вплив заміни частини цементу золою-винесенням на міцність бетонів для транспортних споруд і дорожніх покриттів.

Для виготовлення бетонів використовувався портландцемент ПЦ II/A-Ш-500, щебінь фракції 5-20 мм, кварцовий пісок з $M_{кр}=2,3$, суперпластифікатор Поліпласт СП-1 і зола-винесення Дарницької ТЕЦ. Досліджено властивості бетонів трьох складів. Склад №1 (без золи винесення) використовувався як контрольний і у якості в'язучого в ньому застосовано портландцемент у кількості 300 кг/м^3 . У складі №2 10% портландцементу замінено на 75 кг/м^3 золи-винесення. У складі №3 20% портландцементу замінено на 150 кг/м^3 золи-винесення. У всі бетони вводився суперпластифікатор у кількості $2,4 \text{ кг/м}^3$.

Всі бетонні суміші мали рівну рухомість S1 та їх В/Ц залежало від складу. Для контрольного складу №1 значення В/Ц суміші дорівнювало 0,390. Для складу №2 фактичне В/Ц, тобто за умови розрахунку кількості в'язучого як суми кількості цементу і золи, дорівнювало 0,333. Для складу №3 – 0,308. Тобто у міру збільшення частки золи у в'язучому В/Ц сумішею знижувалася.

Середня густина бетону контрольного складу №1 і складу №2 є приблизно рівною (2441 кг/м^3 і 2446 кг/м^3), а складу №3 дещо меншою (2423 кг/м^3). Це пояснюється тим, що при заміні частини цементу більшою за масою кількістю золи-винесення у бетоні знижується В/Ц суміші, але одночасно збільшується розсунення крупного заповнювача.

Міцність на стиск бетонів визначалася у віці 7 і 28 діб. Встановлено, що у віці 7 діб міцність на стиск бетону складу №2, у якому 30 кг/м^3 цементу замінено на 75 кг/м^3 золи-винесення, є на 6,8% менше міцності контрольного складу №1. Але у віці 28 діб міцність бетону складу №2 є на 3,8% більше міцності бетону контрольного складу №1. Для складу №3 заміна 60 кг/м^3 цементу на 150 кг/м^3 золи винесення викликала зниження міцності на стиск у порівнянні з контрольним складом №1 у віці 7 діб на 28,3%, у віці 28 діб – на 14,0%. Тобто бетони, у складі яких використовувалася зола-винесення, характеризувалися меншою швидкістю набору міцності у порівнянні з бетоном, в якому у якості в'язучого використовувався лише портландцемент. Заміна 10% портландцементу раціональною кількістю золи дозволила отримати бетон з міцністю, яка є не менш міцності контрольного складу. Проте заміна 20% портландцементу не була повністю компенсована введенням золи.

Тобто можливим і ефективним є застосування золи-винесення у складі бетонів транспортних споруд і дорожніх покриттів. Введення раціональної кількості золи дозволяє знизити витрати в'язучого, що має важливе екологічне значення і економічно доцільно.

Ключові слова: зола-винесення, бетон, транспортні споруди, жорстке дорожнє покриття, суперпластифікатор, міцність.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2024

**NON-DESTRUCTIVE METHOD FOR ASSESSING THE STATE OF THE SURFACE
STRUCTURE OF SHELL LIMESTONE**

¹**Semenova S.V.**, Ph.D., Associate Professor,
semenova@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5309-5854

¹**Levytskyi D.V.**, postgraduate student,
levin3893@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5350-522X

¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
4, Didrikhson str., Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. The article proposes a method for assessing the state of the surface structure of shell limestone. Shell limestone taken from the wall of a destroyed one-story building in Odessa was used as the test material for analyzing the surface characteristics of the structure. The structural characteristics of shell limestone vary significantly even within a single layer, so to ensure reliable adhesion of restoration materials, it is necessary to take into account the individual characteristics of the surfaces. The material was studied using modern methods of fractal analysis, which make it possible to determine the key parameters of the surface structure. For the study, photographs of the shell limestone surfaces were obtained using electronic macrophotography, which were then processed in the Guiddion software environment, designed for research in the field of scanning probe microscopy. Modern analysis algorithms were used, including image filtering, calculation of fractal dimension and construction of autocorrelation functions. This made it possible to estimate surface parameters such as roughness, texture and fractal properties. Several methods have been selected to determine the fractal dimension, which is an important task in analyzing structures such as reliefs, textures, and functional surfaces. Fractal analysis of shell limestone images was performed using several measurement algorithms – cube counting methods, triangular prisms, power spectrum, and separation (variational). The used method for assessing the state of the shell limestone surface structure allows for the selection of restoration materials with the required physical, chemical, rheological, and strength properties. The proposed approach can be used to adapt restoration compositions to porous substrates in various architectural and historical monuments.

Keywords: fractal analysis, shell limestone, restoration compositions, adaptation, structure, surface, porous materials, substrate.

Introduction. One of the important tasks of construction materials science, especially relevant in cities – centers of historical, cultural and architectural heritage, is to obtain restoration compositions with an optimal set of performance characteristics: adhesive strength, the ability to set and form a composite layer of sufficient strength with low shrinkage, high vapor permeability, preventing moisture accumulation and freezing in winter. In addition, such composite materials are required to have maximum compatibility in terms of basic chemical properties and physical parameters – the material must be maximally adapted to the surface of the base. A common building material that was used in architectural monuments – historical buildings in Italy, France, Greece, Ukraine, etc. is a local material – shell limestone. This porous sedimentary rock is widely used in architecture, especially in regions with abundant marine sediments. Despite its aesthetic appeal and environmental benefits, the low mechanical strength of shell limestone and its high susceptibility to weathering pose significant challenges in ensuring the durability of buildings and structures made from this stone. Therefore, over time, historical buildings need restoration, reconstruction and preservation, and the choice of composite materials used is a pressing issue in these processes.

Careful selection of compositions of restoration composite materials for shell limestone buildings requires special approaches. The main task of such composites is to strengthen structural

elements while preserving their authenticity and historical value. At the same time, restoration compositions should have good adhesion to the base material (substrate) while maintaining physical and aesthetic integrity over time, that is, ensure sufficient adhesion of the composite and the substrate – shell limestone. The development of methods for selecting optimal compositions of such composite materials to ensure the main performance characteristics is an important and urgent task. A rational approach to the selection of such compositions is a multifaceted and multi-criteria task, in the solution of which an important aspect is related to the study of the surface structure of the substrate to ensure maximum adaptation of restoration composites to the base material.

Analysis of recent research and publications. The main requirement for restoration materials when restoring stone surfaces is to ensure maximum compliance and authenticity both in appearance and in chemical composition, physical and operational properties [1, 2]. Therefore, it is necessary to conduct a thorough chemical and physicochemical analysis of the material being restored, in particular, its surface, for an informed decision when determining the restoration composition.

It should be noted that when restoring the surfaces of stone materials, it is necessary to form a thin intermediate layer, which ensures maximum adaptation of the main volume of the composite material to the restored surface [3]. In this case, conditions are created for even greater adaptation of the main volume of the restoration composite. Therefore, it is important to ensure contact of high adhesive strength between the intermediate restoration layer and the stone, for example, shell limestone, taking into account the high degree of structural heterogeneity of its surface.

A prerequisite for the manifestation of high adhesive characteristics is the ability of the adhesive to fill the main elements of the surface structure – pores of all types, irregularities, surface roughness, cracks and fissures [4]. At the same time, to obtain high adhesive strength of the "adhesive-substrate" contact, it is necessary to ensure the maximum contact area of the base material and the restoration composite. It should be noted that it is necessary to take into account the individuality of the structure of each specific restored area of shell limestone [5] when solving such problems.

The study of the surface structure of restored products, in particular shell limestone, is of interest for the targeted selection of a primer intermediate composition, as well as a restoration composite, in order to ensure chemical, physical and structural compatibility with the porous irregular surface of the shell limestone and adaptation to it.

Fractal geometry as one of the approaches to the description of complex surfaces has been widely used in the study of natural and artificial materials [6-8]. Shell limestone, which is a porous sedimentary rock, exhibits a multi-level structure that is well described by fractal models [9].

It should be noted that there are several types of display and study of fractal-like objects [10]. Often, a boundary or edge fractal is studied, determined by the nature of the boundary surface of the structure being studied. Another option for studying self-similar structures is their representation by a mass fractal associated with the distribution of particles with a certain mass index in space. The micrographs of materials studied in this case are fractal surfaces, the third coordinate of which corresponds to the intensity of the corresponding pixels in the electronic image. Determining the fractal dimensions of surfaces, where intensity acts as the third coordinate, is an important task in the analysis of structures such as reliefs, textures and functional surfaces.

Let us consider some methods for determining fractal dimension in image analysis.

The Box-counting method [11] is designed to estimate the fractal dimension of images considered as three-dimensional surfaces, where the brightness of each pixel is interpreted as height. This approach is useful for analyzing structural properties of complex surfaces, such as roughness or porosity, and relates them to scaling characteristics.

The method is represented by the following algorithm. A two-dimensional image of size $M \times M$ converted to three-dimensional space (x, y, z) , where (x, y) – pixel coordinates, z – pixel brightness level. The image base is divided into a uniform grid with a step s , where is the cell size $s \times s$ is selected so that $M / 2 > s > 1$. Above each cell, a column is constructed consisting of

parallelepipeds with a height calculated from the ratio $\frac{C}{s_z} = \frac{M}{s}$, where C – number of gradations of image brightness.

For each cell the parameter is calculated $n_s(i, j) = z_{\max} - z_{\min} + 1$, where z_{\max} and z_{\min} – maximum and minimum brightness in the current cell. Next, summing up the values $n_s(i, j)$ for all grid cells, get the number of filled cells for the current size s . For different values of s , calculate N_s , which allow you to build a dependency $\log(N_s)$ from $\log(s)$. The slope of the regression curve is used to determine the fractal dimension $D = -\tan(\alpha)$, where α – slope angle of a linear section on a graph $\log(N_s)$ from $\log(s)$. The fractal dimension is determined by the formula (1):

$$D = -\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\log N(\tau)}{\log \tau}. \quad (1)$$

The triangulation (triangular prism) method [12] is used to calculate the fractal dimension of complex surfaces by analyzing the dependence of the surface area on the grid step size. It starts with representing the surface as an image, where the brightness of each pixel is interpreted as the height at the corresponding point. The image is covered with a grid with a step size s , each cell of which includes four points forming a base. For each cell, two diagonals are drawn, the intersection of which defines the central point. The height of this point is calculated as the arithmetic mean of the heights of all four nodes of the cell. Next, four triangles are formed from the cell points, which form the upper part of a polyhedron approximately corresponding to the real topography of the surface. For each triangle, the area is calculated using the standard vector formula through two of its edges. The total area of all triangles gives an estimate of the surface area for a given cell. This process is repeated for all cells of the grid, and the final sum of the areas serves as an estimate of the surface area of the image for a given step size. To calculate the fractal dimension, the method is repeated with different values of s , and the dependence of the surface area on the step is recorded. A logarithmic dependence of the area on the step, known as the Richardson curve, is constructed based on the data obtained. The slope of this dependence on the linear section corresponds to the parameter B , from which the fractal dimension is calculated using the formula $D = 2 - B$. Thus, the triangular prism method allows for an accurate assessment of the fractal characteristics of complex surfaces, for example, to analyze the porosity or roughness of materials.

The idea of the variational method [13] for determining the fractal dimension is to estimate the degree of change of the surface depending on the sample scale by calculating the variational measure $V(r)$. For this purpose, the surface is divided into cells with a linear size r . For each cell, the deviation of the intensity values $z = f(x, y)$ from the average value in the cell is calculated (2):

$$V(r) = \sum_{cell} |f(x, y) - \bar{f}|. \quad (2)$$

Change the scale r and repeat the calculations, then plot the dependence graph $\log V(r)$ from $\log r$. The fractal dimension is calculated using the formula (3):

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \left(3 - \frac{\log V(r)}{\log r} \right). \quad (3)$$

The Power Spectrum Method [14] is based on the analysis of the power spectral density $S(k)$ of the surface at spatial frequency k . To do this, the following successive steps are carried out:

1. Calculate the two-dimensional Fourier transform of a surface $f(x, y)$ (4):

$$F(k_x, k_y) = \iint f(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy. \quad (4)$$

2. Determine the power spectral density (5):

$$S(k) = |F(k_x, k_y)|^2, \quad (5)$$

from $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$.

3. Build a dependency $\log S(k)$ from $\log k$.
4. Calculate the fractal dimension using the formula (6):

$$D = \frac{7 - \beta}{2}, \quad (6)$$

where β – slope of the linear section of the graph $\log S(k)$ from $\log k$.

The methods discussed above allow us to evaluate the fractal properties of shell limestone surfaces, which are the basis for the next stage of rational selection of the composition of restoration materials. Their use in the study provides a comprehensive approach to the analysis of the cellular structure, taking into account the multi-level nature and uniqueness of each sample. Thus, Box counting and Power Spectrum are effective for integral assessment, while Triangulation and Partitioning are better suited for local analysis. This allows us to combine average characteristics with local features, which meets the challenges of developing optimal compositions of composite materials for restoration.

The purpose of the work is to develop a non-destructive method for assessing the state of the surface structure of shell limestone.

Materials and methods of research. A sample of shell limestone taken from the wall of a one-story building being destroyed in Odessa was used as the source material. The surface of its natural chip and cut was examined.

The research methods were based on obtaining photographs by electronic macrophotography and their subsequent processing in the software environment of the Guiddion system, designed for research in the field of scanning probe microscopy. In particular, filtration modules, fractal dimension calculation and autocorrelation function were used.

Various methods of fractal analysis were used in the work: Box counting (cube counting method), Triangulation (triangular prism method), Power Spectrum (power spectrum method), Partitioning (variational).

Research results. The study is the primary stage of the materials science analysis of historical materials with a porous structure for the further application of restoration methods to products made from them, for example, structural elements of buildings of the cultural heritage of Odessa and other cities. The main property of primers and restoration compositions is effective adhesive interaction with the substrate, which requires an individual selection of the compositions of the corresponding composites for each architectural restoration project. The compositions under consideration should be distributed over the surface of the shell limestone in such a way as to ensure the maximum contact area of the "adhesive-substrate". Therefore, certain requirements are imposed on the physicochemical, rheological characteristics, the nature of the distribution of particles in the adhesive composition and its ability to effectively harden within a specified time. The considered set of properties can be characterized as the ability to geometrically and physic mechanically adapt the adhesive to the substrate.

An intermediate stage in the sequence of each restoration project is the assessment of the condition and structure of the surface being restored. Such an assessment can be carried out using several methods, one of which (fractal analysis) has an obvious physical meaning and is associated with the characteristic self-similar properties of the porous materials being restored. In terms familiar to restoration specialists, the determined fractal dimension D_f describes the degree of structural heterogeneity (relief, jaggedness and roughness) of the surface: the greater the value of $D_f - 2$, the more pronounced are the corresponding geometric properties. Fractal analysis allows for a quantitative assessment and differentiation of the considered structural characteristics of samples of visually similar surfaces. In the future, the obtained values of fractal characteristics will allow for an indirect characterization of the requirements for primers and restoration compounds.

The effectiveness of intermediate primers can be studied from a geometric point of view, namely, by assessing how effectively the surfaces under study are "smoothed" when they are used. Thus, for effective primers, the difference in fractal dimensions of the initial and processed surfaces, $D_f^{init} - D'_f$, should be maximum with the necessary consideration of additional conditions and restrictions, which can be a criterion for choosing a composition from several. It is also necessary to note the adaptive nature of the interaction during the formation of the considered types

of adhesive contacts.

Thus, the adhesive composition of the required properties can be approximately selected based on knowledge of the fractal dimension of the substrate, which, together with the Richardson curves, which also characterize multifractal properties [7, 15], can be determined based on the results of processing the images of the material.

In our work, the calculation of fractal characteristics was implemented using the Guiddion program, designed for processing images obtained on nano-technological instruments – scanning probe microscopes. However, the internal functionality is also well suited for analyzing images of a conventional nature.

For the analysis, images of shell limestone chips from different areas of the same sample stone were selected (Fig. 1).

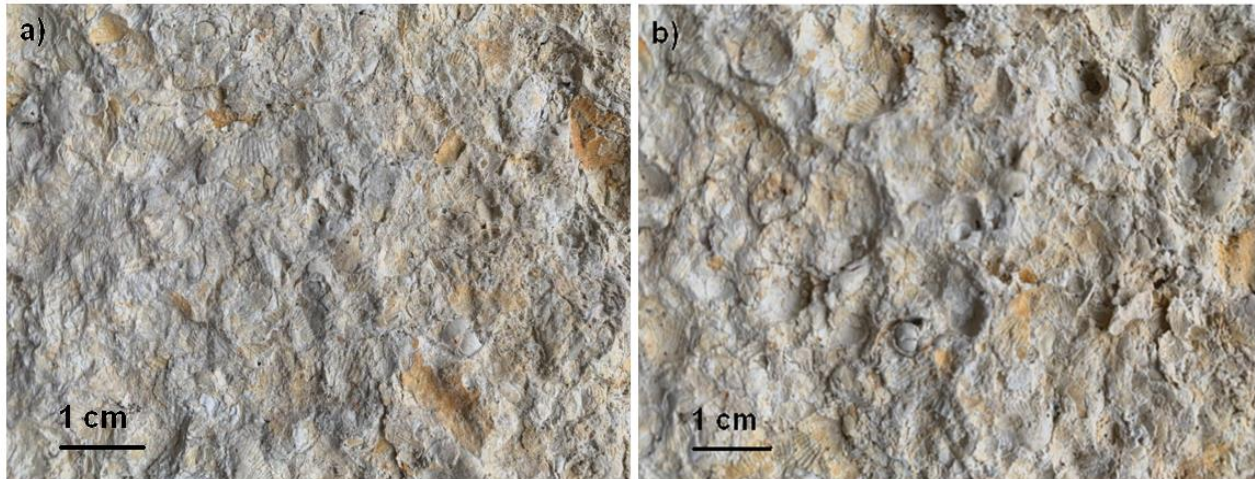


Fig. 1. Photo of the surface of shell limestone: a – section 1; b – section 2

The image was converted to grayscale and subjected to median filtering. After that, the above-described algorithms and methods of fractal analysis were applied. As a result of stepwise change of the cell scale or similar steps, mappings equivalent to Richardson curves were obtained. A linear approximation was constructed for the corresponding methods.

The results of the study and the corresponding values of fractal dimensions are given in Table 1.

The obtained data allow us to approximately characterize the degree of structural heterogeneity of the studied samples. Each of the values obtained as a result of fractal analysis (fractal dimension 2.69 and 2.55) indicate a significant difference between the shell limestone surface and classical mathematical surfaces, which allows us to draw a conclusion about the three-dimensional structure of the studied surfaces. Differences in fractal dimensions indicate different degrees and nature of structural heterogeneities of the surface of the analyzed material even within the same sample. Shell limestone, being a sedimentary rock, was formed and transformed under different physical conditions – significant gradients of flows and concentrations of mineral components, which could be the reason for the differentiated nature of the structural organization.

The requirement for the primer and main restoration composition to ensure maximum contact with the restored surface can be represented by the following geometric condition. Let's consider the "excess" fractal dimension $\Delta D_f^{substrat}$ equal to the fractional part of the corresponding number (for example, 0.69 for a fractal dimension of 2.69). Then the corresponding composition will geometrically adapt to the surface, filling pores and voids until its "excess" fractal dimension complements the "excess" fractal dimension of the material. $\Delta D_f^{adhesiv}$ up to 1, which corresponds to the expression (7):

$$\Delta D_f^{substrat} + \Delta D_f^{adhesiv} \approx 1. \quad (7)$$

Table 1 – Results of fractal analysis of shell limestone images

Measurement algorithm	Section 1 shell limestone (a)	Section 2 shell limestone (b)
Box counting		
Triangulation		
Power spectrum		
Partitioning (variation)		
Fractal dimension	<p>Result</p> <p>Partitioning: 2.83</p> <p>Cube counting: 2.62</p> <p>Triangulation: 2.69</p> <p>Power spectrum: 2.58</p>	<p>Result</p> <p>Partitioning: 2.74</p> <p>Cube counting: 2.55</p> <p>Triangulation: 2.65</p> <p>Power spectrum: 2.25</p>
Average fractal dimension	2.68	2.55

Strict equality in this case corresponds to the formation of an ideal adhesive contact, which forms a three-dimensional structure together with the substrate and the adhesive. In this case, the structural heterogeneity on the surface of the primer layer decreases. Approaching the ratio (7) is an example of the adaptation of the adhesive to the geometric structure of the surface of the porous material.

Conclusions. Thus, in the work, a non-destructive method for assessing the state of the surface structure of shell limestone was substantiated and applied based on the fractal characteristics obtained by appropriate processing of images of this surface. The obtained values of the fractal dimension for different areas of the surface indicate its significant structural heterogeneity. Quantitative results of the fractal analysis can be used to select the composition of the primer layer, and subsequently the main restoration composite, with the required structural parameters, as well as physicochemical and rheological properties.

References

- [1] DSTU-N B V.3.2-4:2016. Nastanova shchodo vykonannya remontno-restavratsiynykh robit na pam`yatkakh arkhitektury ta mistobuduvannya, Kyiv, Ministerstvo rehional'noho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovoho hospodarstva, 2016.
- [2] I. Prokopenko, *Konservatsiya i restavratsiya ob'yektiv kul'turnoyi spadshchyny*. Kyiv, Samit-knyha, 2022.
- [3] N. Orlenko, Li Shuan', "Ispol'zovaniye sovremennykh tekhnologiy restavratsii na pamyatnikakh arkhitektury: opyt ukrainskikh restavratorov", *AMIT*, no. 4(37), pp. 93-103, 2016.
- [4] P.G. Kudryavtsev, "Prognozirovaniye prochnosti adgezionnykh soyedineniy v dispersnykh sistemakh", *Scientific Collection «InterConf» : current issues and prospects for the development of scientific research*, vol. 46, pp. 354–395, 2021.
- [5] O.A. Korobko, V.A. Lisenko, "Struktura i svoystva kamnya-rakushechnika", *Vestnik Odesskoy gosudarstvennoy akademii stroitel'stva i arkhitektury*, №15, s.144-151, 2005.
- [6] C. Bovill, *Fractal Geometry in Architecture and Design*, Springer Science & Business Media, 1996.
- [7] V. Volchuk, I. Klymenko, S. Kroviakov, M. Orešković, "Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism", *Tehnički glasnik*, vol. 12, no. 2, pp. 93–97, 2018.
- [8] B.B. Mandelbrot. *Multifractals and 1/f Noise: Wild Self-Affinity in Physics*. New York, Springe, 1999.
- [9] A. Giri, S. Tarafdar, Ph. Gouze, T. Dutta. "Multifractal analysis of the pore space of real and simulated sedimentary rocks", *Geophys. J. Int.*, vol. 200, pp. 1106–1115, 2015.
- [10] G. Dobrescu, F. Papa, R. State, "Fractal Analysis and Fractal Dimension in Materials Chemistry", *Fractal*, vol. 8(10), 583, 2024.
- [11] R. F. Voss, "Fractals in nature: from characterization to simulation", *The Science of Fractal Images*, pp. 21-70, 1988.
- [12] K.C. Clarke, "Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method", *Computers & Geosciences*, vol. 12, no. 5, pp. 713-722, 1986.
- [13] B. Dubuc, C. Roques-Carnes, C. Tricot, S. W. Zucker, "The variation method: a technique to estimate the fractal dimension of surfaces", *Proc. SPIE. Visual Commun. and Image Process*, vol. 845, pp. 241-248, 1987.
- [14] W. Zahn, A. Zosch, "Characterization of thin film surfaces by fractal geometry", *Fresenius J Anal Chem*, vol. 358, pp. 19-121, 1997.
- [15] S.V. Bozhokin, D.A. Parshi, *Fraktaly i mul'tifraktaly*. NITS "Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika", 2001.

**НЕРУЙНІВНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ СТАНУ СТРУКТУРИ ПОВЕРХНІ
КАМЕНЮ-ЧЕРЕПАШНИКА**

¹Семенова С.В., к.т.н., доцент,
semenova@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5309-5854

¹Левицький Д.В., аспірант,
levin3893@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5350-522X

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона, 4, Одеса, 65029, Україна

Анотація. У статті запропоновано метод оцінки стану структури поверхні каменю-черепашника. Як досліджуваний матеріал для аналізу поверхневих характеристик структури використано черепашник, взятий зі стіни одноповерхової будівлі, що руйнується, в місті Одеса. Структурні характеристики черепашника суттєво варіюються навіть у межах одного шару, тому для забезпечення надійної адгезії реставраційних матеріалів необхідно враховувати індивідуальні особливості поверхонь. Матеріал досліджено з використанням сучасних методів фрактального аналізу, що дозволяють визначити ключові параметри структури поверхні. Для дослідження були отримані фотографії поверхонь черепашника за допомогою електронної макрозйомки, які потім оброблялися в програмному середовищі системи Guiddion, призначеного для досліджень в області зондової скануючої мікроскопії. Були застосовані сучасні алгоритми аналізу, включаючи фільтрацію зображень, розрахунок фрактальної розмірності та побудову автокореляційних функцій. Це дозволило оцінити параметри поверхні, такі як шорсткість, текстура та фрактальні властивості. Для визначення фрактальної розмірності, що є важливим завданням при аналізі структур, таких як рельєфи, текстури та функціональні поверхні, підібрано декілька методів. Фрактальний аналіз зображень черепашника проводився з використанням кількох алгоритмів вимірів – методів рахунку кубів, трикутних призм, спектра потужності, поділу (варіаційного). Використовувана методика оцінки стану поверхні каменю-черепашника дозволяє надалі забезпечити можливість підбору матеріалів для реставрації з необхідними фізико-хімічними, реологічними та властивостями міцності. Пропонований підхід може бути використаний для адаптації реставраційних складів до пористих основ у різних архітектурних та історичних пам'ятках.

Ключові слова: фрактальний аналіз, черепашник, реставраційні склади, адаптація, структура, поверхня, пористі матеріали, субстрат.

Стаття надійшла до редакції 28.11.2024

МІЦНІСТЬ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ДЕРЕВОПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

¹Цапко Ю.В., д.т.н., професор,
juriyts@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0625-0783

¹Бондаренко О.П., к.т.н., доцент,
bondolya3@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8164-6473

¹Цапко О.Ю., PhD, ст. дослідник,
alekseytsapko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2298-068X

²Мазурчук С.М., к.т.н., доцент,
mazurchuk.s.m@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6008-9591

²Касянчук І.О., аспірант,
ivankasianhuk@ukr.net, ORCID: 0009-0004-3741-2903

¹Ющенко А.В., студентка,
alinka29yushchenko@gmail.com, ORCID: 0009-0002-0936-5789

¹Київський національний університет будівництва і архітектури
пр. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

²Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 12в, м. Київ, 03041, Україна

Анотація. У статті акцентується увага на тому, що деревина є добрим теплоізолюючим матеріалом, оскільки має низьку теплопровідність. Але має і негативні властивості, зокрема, схильність до гниття, яка може виникнути через зволоження або неефективну вентиляцію та ін. Для дослідження міцності теплоізоляційних виробів з деревокомпозиційного матеріалу формували зразки різних співвідношень деревини та клею, зокрема, на водорозчинних клеях, а також на поліефірних і епоксидних смолах, шляхом їх змішування з тирсою у пропорції 1:2. Застосування в'язучих на основі синтетичних смол при формуванні теплоізоляційних виробів з тирси деревини підвищує екологічну безпечність, атмосферостійкість виробів, оскільки такі смоли характеризуються стійкістю до води та перепаду температур. А також знижує утворення мікроорганізмів в структурі виробу, адже матеріал, що утеплює споруду, стає більш міцним і твердим та не просідає з часом. Все це зумовлює зменшення трудомісткості укладки теплоізоляції для будівлі й можливості тепло ізолювання теплогенеруючого обладнання та трубопроводів теплоносіїв, витрат будівельних матеріалів і зниження частки енергоносіїв на опалення. Випробовування на міцність при стиску показали, що вироби з тирси на водорозчинних клеях є більш крихкими і міцність на стиск для клею на основі крохмалю знижується у 22 рази, порівняно з клеєм D4 та у понад 30 разів, порівняно з полімерними смолами. Більшу межу міцності мають зразки на клею ПВА D3 та D4, порівняно поліефірною смолою, тому межа міцності зменшується тільки у 1,6 рази. Відповідно деформація при стиску по товщині спресування для виробу на основі епоксидної смоли перевищує значення для поліефірної смоли майже у двічі. Встановлено, що деформація при стиску по площі пресування для виробу, виготовленого на основі епоксидної смоли, перевищує значення для поліефірної смоли.

Ключові слова: будівельні конструкції, тирса деревини, теплоізолювання, міцність на стиск, полімерні смоли, ефективність.

Вступ. Основним матеріалом для виготовлення теплоізоляції є відходи з деревини, оскільки деревина має низьку ціну, довговічність, екологічність. Окрім того, деревина добре вбирає вологу, якщо повітря вологе, а також випаровувати його. Але цей матеріал володіє і негативними властивостями, такими як схильність до гниття, що може виникнути при зволоженні або при впливі мікроорганізмів. Застосування в'язучих речовин на основі синтетичних смол при формуванні виробів з деревини підвищує екологічну безпечність та

атмосферостійкість, оскільки такі смоли характеризуються стійкістю до води та перепаду температур. А також знижує утворення мікроорганізмів в структурі виробу, адже матеріал, що утеплює споруду, стає більш міцним і твердим та не просідає з часом. Все це призводить до зменшення трудомісткості укладки теплоізоляції для будівлі і можливості теплоізолювання теплогенеруючого обладнання та трубопроводів теплоносіїв, витрат будівельних матеріалів та зниження частки енергоносіїв на опалення [1, 2].

Таким чином, виготовлення теплоізоляційних виробів на основі дерево полімерних матеріалів з поліефірних та епоксидних смол потребує встановлення характеристик необхідних для виготовлення виробів і проектування. Що і обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботі [3] показано розробку інноваційного сипучого теплоізоляційного матеріалу із стружки вільхи сірої (*Alnus incana* L. Moench) та луски берези (*Betula pendula*, *Betula verrucosa*) як залишків виробництва фанери. Стружка та пластівці екологічно ефективно перетворюються на волокнисту масу за технологією парового вибуху (SE) при температурах (Т) від 200 до 235 °С і часовому інтервалі від 0 до 5 хв. Найнижчу насипну щільність (53 кг м⁻³) досягав матеріал SE із стружки сірої вільхи з 12% вологи, обробленої при Т 235 °С протягом 1 хв. Це оптимальний результат, який розкриває промислову конкурентоспроможність сипучих теплоізоляційних матеріалів і вказує на обґрунтованість подальшої експертизи.

У статті [4] показано панелі та ДСП, які виготовлялися з очеретяних матів і сумішей очеретяної тріски для використання всередині будівель для звуко- та теплоізоляції. Проте передача звуку панелей зі зшитой очеретяної циновки (1-3 км/с), виявилася меншою порівняно з пропусканням деревно-стружкових плит (17 км/с). Проте суміші очеретяної стружки (2 см) і деревної стружки дали ДСП із кращими механічними властивостями (5-17 МПа), ніж панелі, виготовлені з очеретяних матів (2 МПа). Зафіксовано, що збільшення кількості очеретяної стружки в випробуваних ДСП покращує як звуко-, так і теплоізоляцію з 17 до 6 км/с і з 0,34 до 0,27 Вт/мК відповідно. Проте міцність на вигин зразків була знижена з 26 до 5 МПа. Відзначено збільшення товщини з 18% до 85% через додавання очеретяної стружки.

Рослинна сировина, як зазначено у [5] була переведена в порошок (SP) шляхом фізичної обробки з метою отримання твердих поліуретанових композитних пінопластів. Отримані піни оцінювали через механічні властивості, термічні властивості та комірчасту структуру. Виявлено, що міцність на стиск композиційних пінопластів різко знизилася порівняно з чистою піною, а розмір порошку не мав явного впливу на міцність на стиск у напрямку росту. Міцність на вигин жорстких поліуретанових композитних піл з кукурудзяною соломкою зменшилася з 0,34 МПа (чисті пінопласти) до 0,22 МПа і 0,26 МПа, що зменшилося на 35,3% і 23,5% відповідно. Міцність на вигин неростучої жорсткої поліуретанової композитної піни трохи зменшилася зі збільшенням розміру порошку. Порівняно з чистими пінопластами, теплові властивості жорстких поліуретанових композитних пінопластів з кукурудзяною соломкою не змінилися.

Основа дослідження [6] полягала у визначенні теплопередачі в природній ізоляції з золи рисового лушпиння і овечої вовни (SWRNA), попелу з рисової лушпиння з сизалевими волокнами (SFRNA), попелу з рисової лушпиння з банановими волокнами (BFRNA) та ізоляція повітряного зазору. Сталеві труби мали внутрішній діаметр 63 мм і довжину 1 метр. Максимальна теплопровідність сизалевого волокна, овечої вовни, бананового волокна та золи рисового лушпиння становила (0,045, 0,044, 0,094 та 0,4) Вт/м·К відповідно. Для труби одиначної довжини при 90°С максимальне енергозбереження BFRNA, SFRNA, SWRNA з повітряним зазором та азбестовою ізоляцією становило (244,708, 242,804, 241,602 і 1443,772) кВт·год/рік, відповідно. Тому, як показав результат, характеристики BFRNA, SFRNA та SWRNA з повітряним зазором кращі, ніж у азбестової ізоляції.

В роботі [7] запропоновано використовувати теплоізоляційні матеріали, які зазвичай використовуються в умовах низьких температур. Нові біоматеріали з волокна пера, розроблені в цій роботі, мають надзвичайно низьку теплопровідність, але зберігають високу

ударостійкість при низьких температурах. Повідомлені експерименти демонструють покращену ударостійкість біоматеріалів із пір'яного волокна порівняно зі спіненим нітрильним каучуком, які дозволяють використовувати їх як ударостійку теплоізоляцію при низьких температурах.

В роботі [8] сказано, що у процесі технічного огляду будівель та споруд, що зведені із застосуванням пиломатеріалів з деяких видів карпатської ялини, масово спостерігаються процеси виходу з робочого стану конструктивних елементів. Рішення можуть бути обумовлені невідповідністю властивостей карпатської ялини до заявлених характеристик у нормативних документах. Проведено порівняльний аналіз результатів комплексних досліджень. Сформульовані рекомендації щодо внесення змін до нормативних документів.

За результатами експерименту, наведених у роботі [9] побудовано математичні моделі та наведено графіки залежності коефіцієнта теплопровідності та міцності на стиск від співвідношень тирса/цемент і вода/цемент при постійних співвідношеннях пісок/цемент і вапно/цемент. Встановлено, що зі збільшенням вмісту тирси в суміші (співвідношення тирса/цемент знаходиться в межах від 0,25 до 0,75) міцність зразків суттєво знижується (до 64%), а коефіцієнт теплопровідності зменшується в середньому на 15%. Підібрано склади сумішей із заданими значеннями коефіцієнта теплопровідності, що мають показники міцності при стиску в діапазоні від 0,4 до 1,1 МПа, які дозволяють отримувати теплоізоляційні деревоцементні матеріали.

Типова міцність деревини робить її придатною як конструкційний матеріал [10]. Розглядаючи ключові структурні особливості, від молекулярного до макроскопічного рівнів, які визначають еластичність і стисливість деревини та стосуються схеми збирання лігноцелюлозних компонентів деревини, відповідного спірального розташування в клітинній стінці та анізотропії, яка контролює властивості пружності та стиснення.

У статті [11] створено новий композит, виготовлений із дугоподібного колотого бамбука та деревини тополі. Середній модуль пружності при вигині та міцність для дугоподібного бамбукового розколу становили 12179,33 МПа та 195,77 МПа відповідно, міцність на зсув адгезійного шару в композиті дугоподібного бамбука та деревини тополі становила надійні 8,02 МПа. Максимальне навантаження на вигин дугоподібного композиту бамбук-тополя становило 9896,29 Н, що майже вдвічі більше, ніж у сплющеного композиту бамбук-тополя.

Високоєфективний дерев'яний скрайбер (HPWS), який наведено у роботі [12], демонструє чудові механічні властивості та стабільність розмірів, що робить його перспективним матеріалом для несучих компонентів у будівництві. Результати показали, що як розмір площі поперечного перерізу, так і довжина значно впливають на міцність на стиск HPWS. Вплив HPWS на розмір виявився слабшим порівняно з іншими конструкційними виробами з деревини або бамбука. Були запропоновані методи розрахунку для кількісної оцінки ефекту розміру на HPWS. Ці висновки закладають міцну основу для просування використання HPWS у будівництві.

У статті [13] досліджували вплив гіперрозгалуженого полієфіру (CHBP) із кінцевими карбоксильними групами на механічні, кристалічні та термічні властивості полімолочної кислоти (PLA)/солом'яного борошна (SF) за допомогою екструзійного лиття під тиском. Крім того, ми додали традиційний пластифікатор поліетиленгліколь (PEG) для синергізму з CHBP для підвищення міцності композитів PLA/SF. Результати показали, що відповідне додавання CHBP ефективно покращило міжфазний зв'язок між PLA і солом'яним борошном. Введення CHBP також покращило міцність на розрив, міцність на вигин, ударну міцність, подовження при розриві, термічну стабільність і швидкість кристалізації композитів. Крім того, додавання як CHBP, так і PEG значно покращило ударну міцність композитів порівняно з використанням лише PEG. Дослідження демонструє доцільність використання гіперрозгалужених полімерів і пластифікаторів для підвищення міцності, термічної стабільності та кристалічних властивостей деревно-пластикових композитів PLA, забезпечуючи новий підхід до покращення властивостей цих композитів.

В роботі [14] сказано, що виготовлення індивідуального шару (ILF) це новий процес адитивного виробництва, розроблений для створення об'єктів із високим вмістом деревини та високою механічною міцністю. Тут тонкі дерев'яні композитні панелі з індивідуальними контурами створюються за допомогою струминної обробки сполучною речовиною та подальшого механічного пресування. Було виявлено, що взаємодія між кількістю клею та тиском, який використовується для виготовлення панелей, має велике значення для геометричних властивостей. Було визначено три основні механізми, які відповідають за механічні властивості виготовлених деталей, а саме: 1) кількість клею в панелях, що зв'язує частинки; 2) щільність панелей; 3) кількість клею для ламінування панелей.

Отже, в результаті аналізу літературних джерел встановлено, що деревокомпозиційні матеріали здатні розкладатися при експлуатації та не встановлені параметри, що забезпечують їх стійкість до втрати міцності. Тому, встановлення параметрів міцності при виготовленні композицій з деревини та впливу речовин, які входять до їх композицій, і обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

Мета дослідження. Метою роботи є встановлення міцнісних характеристик теплоізоляційного виробу з тирси деревини й клеєних сумішей для визначення умов їх застосування.

Матеріали і методи досліджень. Для дослідження міцності теплоізоляційних виробів з деревокомпозиційного матеріалу формували зразки різних співвідношень деревини та клею, зокрема, на водорозчинних клеях (табл. 1), а також на поліефірних і епоксидних смолах, шляхом їх замішування з тирсою у пропорції 1:2 [15] (рис. 1).

Таблиця 1 – Пропорції тирси та клею при формуванні зразків деревополімерних виробів на водорозчинних клеях

Тирса+клей D4+вода (100 г)			
Параметри	Стружка	Клей	Вода
Вага	60,24	107,72	100
	60,38	120,95	100
	60,72	134,74	100
Тирса +клей ПВА D3+вода (200 г)			
Параметри	Стружка	Клей	Вода
Вага	60,3	100,9	200
	60,3	102,53	200
	60,4	107,9	200
Тирса +крохмаль+вода (100 г)			
Параметри	Стружка	Крохмаль	Вода
Вага	60,56	144,3	240



а)



б)

Рис. 1. Зразки виробів для досліджень: а – напівциліндр; б – сегменти для випробувань

З отриманих сумішей формували напівциліндри розмірами: зовнішній діаметр – 40 мм, внутрішній діаметр – 24 мм і довжиною близько 120 мм. Зразки на водній основі витримували у сухоповітряному середовищі, зразки на сухих сумішах полімерних смол спікали за температури 200 °С протягом 20 хв. (рис. 1).

Для встановлення експлуатаційної ефективності дерево полімерного виробу проводили визначення міцності на стиск. Визначення міцності на стиск виробів з деревини проводили згідно з ISO 13061-3:2014 [15, 16].

Результати досліджень. На рис. 2 та у табл. 2 показано результати досліджень стійкості деревополімерного матеріалу до стиску.



Рис. 2. Дослідження на міцність теплоізоляційних виробів з деревини

Таблиця 2 – Межа міцності зразків виробу з тирси на стиск по товщині спресування

№ зразка	Маса m_0 , г	Розміри, мм			Навантаження, P_{max} , Н	σ , МПа	Деформація, мм
		b	h	d			
Виріб з тирси, клею D4 і води (100 г)							
1	28,81	42,50	56,00	37,91	2235,07	0,99	12,4
2	49,96	55,15	26,30	25,93	2236,64	2,12	7,8
3	43,81	47,92	24,40	31,06	2271,93	1,50	10,4
Виріб з тирси, крохмалю і води (100 г)							
1	63,45	52,41	30,85	40,42	294,36	0,11	4,0
2	83,26	55,62	27,94	30,04	96,70	0,07	3,1
3	63,45	35,15	22,10	36,20	107,56	0,05	2,8
Виріб з тирси, клею ПВА D3 і води (200 г)							
1	48,26	36,03	65,00	29,71	2695,18	1,94	13,5
2	53,73	52,45	25,60	45,85	1494,87	0,45	10,7
3	49,34	42,71	23,80	32,04	2131,87	1,32	12,2
Виріб з тирси і епоксидної смоли							
1.1	14,31	48,55	25,15	25,30	2035,28	3,2	12,20
1.2	15,22	57,17	25,65	23,40	1184,40	2,0	11,70
1.3	14,75	55,77	25,60	25,00	1560,90	2,4	11,50
Виріб з тирси і поліефірної смоли							
2.1	12,82	48,00	35,00	20,00	1139,81	2,3	6,60
2.2	15,12	58,15	25,30	20,05	1324,40	3,2	7,20
2.3	14,14	55,65	23,40	18,20	1184,40	2,0	6,70

Дослідження міцності на стиск для виробів з деревини на водорозчинних клеях по товщині пресування показало їх значну крихкість. Особливу низьку міцність показав зразок виготовлений на основі крохмалю з середнім значенням 0,08 МПа, краще значення отримав зразок на клею ПВА D3 – 1,24 МПа та зразок на клею D4 – 1,54 МПа. Для зразків на основі

полімерних смол міцність на стиск склала: для епоксидної смоли середнє значення 2,53 МПа, поліефірної – 2,5 МПа. Встановлено, що деформація при стиску по площі пресування для виробу виготовленого на основі епоксидної смоли перевищує значення майже в двічі для поліефірної смоли.

Необхідно зазначити, що присутність у дерево полімерному матеріалі синтетичної смоли призводить до утворення з тирсою деревини еластичного шару стійкого до механічних коливань. Вочевидь такий механізм впливу еластичної компоненти є тим фактором регулювання процесу утворення композиційного шару, завдяки якому механічна стійкість зберігається. Це означає, що врахування даного факту відкриває можливість для ефективного регулювання властивостями дерево полімерного матеріалу безпосередньо в умовах серійного промислового виробництва.

Зіставлення експериментальних досліджень з визначення механічних властивостей дерево полімерним матеріалом та теоретичних припущень, дозволяють стверджувати наступне: суттєвий вплив на процес механічної стійкості при застосуванні деревинного матеріалу здійснюється у напрямку орієнтації природного матеріалу та властивостей полімерного матеріалу.

Разом з тим є можливість знизити густину виробу шляхом проведення полімеризації суміші з синтетичної смоли та деревної тирси, що разом з тим гальмує теплопровідність. Все це підвищує екологічність виробів з деревини, оскільки відсутні виділення хімічних речовин та розширює сферу її застосування.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Дослідження міцності на стиск наведених деревополімерних виробів показали, що виріб на водорозчинних клеях є більш крихким. Міцність на стиск виробу, виготовленого на основі крохмалю, знижується у 22 рази, порівняно з клеєм D4 та у понад 30 разів, порівняно з полімерними смолами. Більшу межу міцності мають вироби, які виготовлені на клею ПВА D3 та D4, межа міцності яких зменшується тільки у 1,6 рази, порівняно з виробом на основі поліефірної смоли. Встановлено, що деформація при стиску по товщині пресування для виробу на основі епоксидної смоли перевищує значення для поліефірної смоли майже у двічі.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на встановлення взаємозв'язку між складовими та властивостями водорозчинних клеїв, а також їх оптимізацію.

Література

1. Tsapko Yu., Tsapko A. Establishment of fire protective effectiveness of reed treated with an impregnating solution and coatings. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4. No 10 (94). P. 62-68. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141030>.
2. Tsapko Yu., Bondarenko O., Tsapko A. Effect of a flame-retardant coating on the burning parameters of wood samples. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2. No 10 (98). P. 49-54. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163591. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/163591/165012>.
3. Andzs M., Tupciauskas R., Veveris A., Gravitis J. Impact of wood fraction, moisture and steam explosion on the development of an innovative insulation material. *Vide. Tehnologija. Resursi – Environment, Technology, Resources*. 2015. Vol. 1. P. 11-15. URL: <https://doi.org/10.17770/etr2015vol1.210>.
4. Karademir A., Yetis F., Imamoglu S., Varlibas H. Utilization of water reed in production of various insulation panels. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2013. Vol. 20. Issue 4. P. 371-377. URL: <https://docs.opendeved.net/lib/5KQ9PT2X>.
5. Jiang D., Wang Y., Li B., Sun C., Guo Z. Environmentally friendly alternative to polyester polyol by corn straw on preparation of rigid polyurethane composite. *Composites Communications*. 2020. Vol. 17. P. 109-114. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2019.11.007>.
6. Alamnia A.T., Samuel Fatoba O., Jen T.-C. Heat Transfer Investigation in Natural Fibers Insulation for Steam Pipes Application. *IEEE 13th International Conference on Mechanical and*

Intelligent Manufacturing Technologies, ICMIMT. 2022. P. 211-216. DOI: 10.1109/ICMIMT55556.2022.9845292. URL: https://www.researchgate.net/publication/362515590_Heat_Transfer_Investigation_in_Natural_Fibers_Insulation_for_Steam_Pipes_Application.

7. Zhao Y., Dieckmann E., Cheeseman C. Low-temperature thermal insulation materials with high impact resistance made from feather-fibres. *Materials Letters: X.* 2022. Vol. 6. 100039. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mlblux.2020.100039>.

8. Череднік Д.Л., Пригунков О.В., Кузуб Ю.М. Вплив закономірностей структури річних кілець та природних вад на фізико-механічні властивості карпатської ялини. *Науковий вісник будівництва.* 2023. Т. 1. №109. С. 50-55. DOI: 10.33042/2311-7257.2023.109.1.8. URL: <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/101>.

9. Kuznetsova N.V., Seleznev A.D. Component Compositions of Mixtures of Cement-Wood Heat-Insulating Material. *Lecture Notes in Civil Engineering.* 2023. Vol. 28. P. 105-113. DOI: 10.1007/978-3-031-12703-8_11. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-12703-8_11.

10. Fu Z., Lu Y., Wu G., Liu S., Rojas O.J. Wood elasticity and compressible wood-based materials: Functional design and applications. *Progress in Materials Science.* 2024. Vol. 147. 101354. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101354>.

11. Wang S., Jiang Z., Wang X., Chen, L., Ma X. Study on interface bonding and mechanical properties of arc-shaped bamboo-poplar wood composites. *Industrial Crops and Products.* 2024. Vol. 222. 119573. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119573>.

12. Wu G., Zhang Y., Zhong Y., Ren H., Shen Y. Size effect on the compressive strength of a novel structural wood composite: High-performance wood scrimber. *Industrial Crops and Products.* 2024. Vol. 221. 119381. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119381>.

13. Liu C., Yuan W., Ma W., Cui L., Guan C. Influence of carboxy-terminated hyperbranched polyester and polyethylene glycol on the mechanical and thermal properties of polylactic acid/straw flour composites. *International Journal of Biological Macromolecules.* 2024. Vol. 279. 135226. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135226>.

14. Buschmann B., Henke K., Asshoff C., Talke M.-K., Bunzel F. Additive manufacturing of wood composite parts by individual layer fabrication – influence of process parameters on product properties. *Composites Part C: Open Access.* 2024. Vol. 15. 100504. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100504>.

15. Horbachova O.Yu., Tsapko Yu., Tsarenko Y., Mazurchuk S.M., Kasiyanchuk I.O. Justification of the wood polymer material application conditions. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine).* 2023. Vol. 10 (2). P. 49-55. DOI: 10.21272/jes.2023.10(2). URL: <https://jes.sumdu.edu.ua/justification-of-the-wood-polymer-material-application-conditions/>.

16. ISO 13061-3:2014. Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens. *Part 3: Determination of ultimate strength in static bending.* 2014. P. 1-5. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/60065/5c53a08bc66943418d5a7d2c31e9869f/ISO-13061-3-2014.pdf>.

References

- [1] Yu. Tsapko, A. Tsapko, "Establishment of fire protective effectiveness of reed treated with an impregnating solution and coatings", *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, vol. 4, no. 10 (94), pp. 62-68, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141030>.
- [2] Yu. Tsapko, O. Bondarenko, A. Tsapko, "Effect of a flame-retardant coating on the burning parameters of wood samples", *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 10 (98), pp. 49-54, 2019. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163591. [Online]. Available: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/163591/165012>.

- [3] M. Andzs, R. Tupciauskas, A. Veveris, J. Gravitis, "Impact of wood fraction, moisture and steam explosion on the development of an innovative insulation material", *Vide. Tehnologija. Resursi – Environment, Technology, Resources*, vol. 1, pp. 11-15, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17770/etr2015vol1.210>.
- [4] A. Karademir, F. Yetis, S. Imamoglu, H. Varlibas, "Utilization of water reed in production of various insulation panels", *Science and Engineering of Composite Material*, vol. 20, no. 4, pp. 371-377, 2013. [Online]. Available: <https://docs.opendeved.net/lib/5KQ9PT2X>.
- [5] D. Jiang, Y. Wang, B. Li, C. Sun, Z. Guo, "Environmentally friendly alternative to polyester polyol by corn straw on preparation of rigid polyurethane composite", *Composites Communications*, vol. 17, pp. 109-114, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2019.11.007>.
- [6] A.T. Alamnia, O. Samuel Fatoba, T.-C. Jen, "Heat Transfer Investigation in Natural Fibers Insulation for Steam Pipes Application", *IEEE 13th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies, ICMIMT*, pp. 211-216, 2022. DOI: 10.1109/ICMIMT55556.2022.9845292. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/362515590_Heat_Transfer_Investigation_in_Natural_Fibers_Insulation_for_Steam_Pipes_Application.
- [7] Y. Zhao, E. Dieckmann, C. Cheeseman, "Low-temperature thermal insulation materials with high impact resistance made from feather-fibres", *Materials Letters: X*, vol. 6, 100039, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mlblux.2020.100039>.
- [8] D.L. Cherednik, O.V. Prygunkov, Yu.M. Kuzub, "The influence of the regularities of the structure of annual rings and natural defects on the physical and mechanical properties of Carpathian spruce", *Scientific bulletin of construction*, vol. 1, no. 109, pp. 50-55, 2023. DOI: 10.33042/2311-7257.2023.109.1.8. [Online]. Available: <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/101>.
- [9] N.V. Kuznetsova, A.D. Seleznev, "Component Compositions of Mixtures of Cement-Wood Heat-Insulating Material", *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 28, pp. 105-113, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-12703-8_11. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-12703-8_11.
- [10] Z. Fu, Y. Lu, G. Wu, S. Liu, O.J. Rojas, "Wood elasticity and compressible wood-based materials: Functional design and applications", *Progress in Materials Science*, vol. 147, 101354, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101354>.
- [11] S. Wang, Z. Jiang, X. Wang, L. Chen, X. Ma, "Study on interface bonding and mechanical properties of arc-shaped bamboo-poplar wood composites", *Industrial Crops and Products*, vol. 222, 119573, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119573>.
- [12] G. Wu, Y. Zhang, Y. Zhong, H. Ren, Y. Shen, "Size effect on the compressive strength of a novel structural wood composite: High-performance wood scrimber", *Industrial Crops and Products*, vol. 221, 119381, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119381>.
- [13] C. Liu, W. Yuan, W. Ma, L. Cui, C. Guan, "Influence of carboxy-terminated hyperbranched polyester and polyethylene glycol on the mechanical and thermal properties of polylactic acid/straw flour composites", *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 279, 135226, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135226>.
- [14] B. Buschmann, K. Henke, C. Asshoff, M.-K. Talke, F. Bunzel, "Additive manufacturing of wood composite parts by individual layer fabrication – influence of process parameters on product properties", *Composites Part C: Open Access*, vol. 15, 100504, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100504>.
- [15] O.Yu. Horbachova, Yu. Tsapko, Y. Tsarenko, S.M. Mazurchuk, I.O. Kasiyanchuk, "Justification of the wood polymer material application conditions", *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, vol. 10 (2), pp. 49-55, 2023. DOI:

10.21272/jes.2023.10(2). [Online]. Available: <https://jes.sumdu.edu.ua/justification-of-the-wood-polymer-material-application-conditions/>.

- [16] ISO 13061-3:2014, "Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens", *Part 3: Determination of ultimate strength in static bending*, pp. 1-5, 2014. [Online]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/60065/5c53a08bc66943418d5a7d2c31e9869f/ISO-13061-3-2014.pdf>.

STRENGTH OF HEAT-INSULATING WOOD-POLYMER MATERIALS

¹**Tsapko Yu.**, Doctor of Technical Sciences, juriyts@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0625-0783

¹**Bondarenko O.**, PhD, Associate Professor, bondolya3@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8164-6473

¹**Tsapko A.**, PhD, Senior Researcher, alekseystapko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2298-068X

¹**Mazurchuk S.N.**, PhD, Associate Professor, mazurchuk.s.m@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6008-9591

²**Kasyanchuk I.**, Postgraduate student, ivankasianhuk@ukr.net, ORCID: 0009-0004-3741-2903

¹**Yushchenko A.**, Student, alinka29yushchenko@gmail.com, ORCID: 0009-0002-0936-5789

¹*Kyiv National University of Construction and Architecture*

Air Force ave., 31, Kyiv, 03037, Ukraine

²*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*
Heroiv Oborony str., 15, Kyiv, 03041, Ukraine

Abstract. The article emphasizes that wood is a good insulating material because it has low thermal conductivity. However, it also has negative properties, such as a tendency to rot, which can occur due to moisture or inefficient ventilation, etc. To study the strength of wood-composite insulation products, samples of different ratios of wood and adhesive were formed, in particular, with water-soluble adhesives, as well as with polyester and epoxy resins, by mixing them with sawdust in a 1:2 ratio. The use of binders based on synthetic resins in the formulation of thermal insulation products from sawdust improves environmental safety and weather resistance of products, as such resins are characterized by resistance to water and temperature changes. It also reduces the formation of microorganisms in the structure of the product, because the material that insulates the building becomes stronger and harder, and does not sag over time. All of this leads to a reduction in the labor intensity of laying thermal insulation for a building and the possibility of insulating heat-generating equipment and heat-carrying pipelines, reducing the consumption of building materials and reducing the share of energy for heating. The study of compressive strength showed that sawdust products with water-soluble adhesives are more fragile and the compressive strength for starch-based adhesives is 22 times lower than for D4 adhesive and more than 30 times lower than for polymer resins. The samples with PVAc D3 and D4 adhesive have a higher tensile strength than those with polyester resin, so the tensile strength decreases only 1.6 times. Accordingly, the compressive strain along the compression thickness for the epoxy-based product exceeds the value for polyester resin almost twice.

Keywords: building structures, wood sawdust, thermal insulation, compressive strength, polymer resins, efficiency.

Стаття надійшла до редакції 18.11.2024

**APPLICATION OF INNOVATIVE MATERIALS IN MODERN
HYDROTECHNICAL ENGINEERING**

¹**Khoneliia N.N.**, PhD, Associate Professor,
khonelianatela@gmail.com, ORCID: 0009-0000-4323-0293

¹**Bugaeva S.V.**, PhD, Associate Professor,
s.bugaeva2408@gmail.com, ORCID: 0009-0000-3805-3720

¹**Lopatin K.O.**, graduate student,
SLodessa80@gmail.com, ORCID: 0009-0002-0794-8366

¹*Odessa National Maritime University*
34, Mechnikova st., Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. When designing of berthing structures (quay walls), the determination of the pressure of reinforced backfill soil plays an important role. The ability of berthing structures to withstand loads depends on many factors, including their age, mode of operation, changes in the characteristics of construction materials, soil bases over time and others. In some cases, the ability to withstand loads decreases significantly over time, while in other cases it increases significantly. Sometimes, the ability of the structure to withstand loads increases during the first period of operation, and then decreases. In some cases, on the contrary, it decreases in the initial period, but then increases. Therefore, it is not possible to establish the actual value of the bearing capacity of structures only theoretically due to the lack of information about the technical condition at this stage of operation, as well as the difficulty of identifying the actual picture of the interaction between the structure and the grounded medium. This task can be solved through experimental and theoretical studies.

It is essential to investigate the stages of development and market introduction of innovative materials in the field of hydraulic engineering, to justify the possibility of increasing the reliability and the load-bearing capacity of corner-type structures with a buttress during reconstruction with the use of geotextile materials. These structures were built in the past and require modernization and reconstruction. The issue of reconstruction of corner-type structures with a buttress is relevant for Ukraine ports. Currently, there are no unequivocal methods of determining the effectiveness of berths reconstruction due to the complexity of the task given to the number of variables.

The article describes the determination methods of the reinforcement effect by geotextile material; developed models taking into account not only the structure and characteristics of the geotextile materials but also its location in the ground mass. Therefore, the model considers both the parameters of the backfill soil and the geomaterial characteristics and the depth of their embedment.

Keywords: berthing structures, reconstruction, geotextile materials, the backfill soil, the reinforcement effect, corner-type structures with a buttress.

Introduction. Ports are a connecting link between sea and land transport. To fulfil their purpose, ports must have facilities that meet the requirements of various means of transport, be equipped with powerful transshipment machinery, and boast modern routes from the sea and the land.

The National Transport Strategy of Ukraine for the period of up to 2030 [1] says that seaports located on the territory of Ukraine in the Black Sea-Azov Basin and the Danube Delta have a total capacity of more than 230 million tons per year.

The document underlines that the Strategy implementation needs tasks in the main areas to be carried out, including: competitive and efficient transport system; innovative development of the transport industry and global investment projects.

Most investment funds for infrastructure improvement are expected from external sources, primarily from international financial institutions, private investors and public-private partnership projects. Attracting investment funds from such sources to innovative transport projects is a condition

for developing the transport industry, national security, and the country's competitiveness.

The Strategy also indicates general issues that need to be solved. They include lack of transport industry funding, low level of resource management and insufficient measures for the stable development of enterprises in the transport industry, high level of wear and tear of fixed assets (the degree of wear and tear of fixed assets of transport and warehouse enterprises in 2014 amounted to 97.9 per cent), technological backwardness of transport and infrastructure, low level of introduction of modern technologies and implementation of innovative policy in the transport sector.

The results of ensuring the actual depths in seaports and approach channels in compliance with the established passport characteristics, development of deep-sea seaports, etc., are expected for the modernization of river transport and deep-sea seaport infrastructure.

Statement of the problem. One of the main active factors for the development of water transport in Ukraine is the state of waterways and hydraulic facilities and structures, which are the most important components of the industry's transport infrastructure.

Hydrotechnical structures include engineering and technical structures (quay walls, mooring structures, piers of all categories and designations, enclosing and protective hydraulic facilities) designed to ensure safe approach, maneuvering, mooring and departure of vessels and to protect the water area of the port or coastal strip.

The Strategy for the development of seaports of Ukraine for the period up to 2038 [2] provides for the creation of capacities for processing in seaports of at least 250 million tons of cargo per year and ensuring the effective development of port infrastructure facilities, the introduction of innovative activities by seaports through the application the recent technologies, increasing the efficiency of the use of transshipment complexes of seaports to 75 – 80 per cent.

Over the years, starting from the second half of the 20th century, the quay front increased in two directions: due to the reconstruction of existing ports and wharves of the old structure and due to the construction of new ports, including two largest ports – Chornomorsk and Pivdennyi, which were created precisely at this time period. The construction of new ones and repeated reconstruction of existing ports ensured the availability of loading and unloading capacities, which mainly meet the country's needs. However, a significant part of the quay front remains unsatisfactory and needs reconstruction, technical re-equipment, and significant repairs. Therefore, the number of the old fund quays in Ukraine amounts to 30 – 35% of all existing quays; this is a good foundation for introducing innovative technologies and new materials to increase the carrying capacity and raise cargo turnover.

Open-piled quay walls and sheet-pile quay walls are the most common types of quay walls used for berths in Ukrainian ports. However, there are corner-type structures with a buttress. The share in the total the waterfront is not large. They were built in the past and require modernization and reconstruction.

The successful development of commercial seaports is impossible without constant engineering and scientific research related to the functioning of hydro-technical structures and equipment, movements and deformations of structures, and determination of the possibility of their further operation under increased cargo turnover of ports. An important issue in hydraulic engineering implies also determining the expediency of reconstruction of existing structures or the construction of new ones and modernization of existing facilities based on modern innovative technologies. This finds its practical application in the form of the development and implementation of relevant, innovative projects. One of the promising innovative ways in this direction is the use of geotextile materials. The effectiveness of the evaluation of any project is determined by the methods chosen for its implementation, i.e. a set of techniques and operations used for project evaluation. Under conditions of competition, there are always three components of justification – cheaper, faster, and better quality. Therefore, in modern conditions, highly effective projects of modernization of quays with innovative materials, which are a way to increase investments in ports, occupy a rather important place.

The analysis of many years of experience in scientific research, design and construction shows various ways of achieving effective results: the refinement of calculation methods, changes in the structural forms and profile of buildings, and the development of a more progressive technology for their construction. Thus, it is important to determine the effectiveness of using innovative materials that lead to cheaper construction or reconstruction of marine berthing structures and to increase the

reliability and bearing capacity.

Currently, there are no unequivocal methods of determining the effectiveness of berth reconstruction due to the complexity of the task given to the number of variables. In particular, marine berthing structures are in a constant state of stress, operate under aggressive environmental conditions, and are characterized by reduced maintainability.

Analysis of research and publications. In most practical applications, reinforced soils are obtained by incorporating continuous reinforcement inclusions (for example, strip, bar, sheet, mat, or net) within a soil mass in a definite pattern. The literature has explained the reinforcing mechanisms for such reinforced soils in different forms since Henry Vidal developed the first modern form of soil reinforcement in 1966.

Later on, such scientists as R.H. Basset [3], K.Z. Adraves [4], Yu.V. Feofilov [5], M.F. Drukovanyi [6], Yu.B. Balashov [7, 8], O.A. Ruban [9] and others studied the issues related to soil reinforcement. The results of studies on field applications of reinforced soils show that much care is required. Since the influences of engineering properties of soil and geotextile, and the scale effects on the stress-strain characteristics of reinforced soils have not been investigated fully on a large scale, the actual behavior of reinforced soils is not yet sufficiently studied.

Various small-scale laboratory experiments were performed on sand soils (e.g., V.A. Guido, A.V. Sweeny [10]; K.H. Khing, B.M. Das et al. [11]; T. Yetimoglu, Wu, A. Saglamer [12]) using single or multilayered of geomaterial. It was confirmed by most researchers that there was a significant increase in bearing capacity and a decrease in settlement of soil reinforced with geomaterial. The increase in bearing capacity of reinforced foundation is defined in terms of bearing capacity ratio, which is defined as the bearing capacity of reinforced soil to that of unreinforced soil.

A layer of geomaterial reduces the outward horizontal stresses transmitted from the overlying soil backfill to the top of the underlying soil. This action of geomaterials is known as shear stress reduction effect. This effect results in a general-shear, causing an increase in the load-bearing capacity of the foundation soil (R.D. Espinoza and J.D. Bray [13]; M.T. Adams and J.G. Collin [14]).

P.L. Bourdeau et al. [15], J.P. Giroud et al. [16] performed research that showed that a layer of geomaterial redistributes the applied surface load in the backfill soil. This leads to a decrease in pressure and a reduction of stress in the foundation soil. They have proven that the friction mobilized between the soil and a layer of geomaterial plays an important role in decreasing soil pressure. The results of experimental studies of soil reinforcement with geotextile materials are devoted to works by S.V. Bugaeva and A.A. Baranova [17, 18], which demonstrated the effectiveness of their use for reinforcing the soil bases of structures.

Based on the above, it should be noticed that so far maximum use of soil reinforcement technology has been made in the construction of Retaining walls. Due to limited awareness among practicing engineers and the high cost of reinforcing materials the technology of soil reinforcement for berthing structures has not found its widespread in our country. A literature review has been done that has given the idea to research issues of determining the stability coefficient of berthing structures when reinforcing the backfill soil.

The purpose of the research is to perform theoretical and experimental studies to evaluate the use of geotextile materials in hydraulic engineering.

The tasks of the research are as follows:

- to determine the effectiveness of using innovative materials in the field of hydraulic engineering;
- to carry out experimental studies to establish the effect of reinforcement on the wall when using geotextile materials located in the backfill soil and the most effective placement;
- to substantiate the possibility of increasing the reliability and bearing capacity of the berthing structure during construction and reconstruction with the use of geotextile materials in the backfill soil;
- to compare the results of experimental studies with the results obtained in the PLAXIS software package;
- to apply the research results to a corner-type structure with a buttress to analyze the preliminary reconstruction options.

The research methods:

- the theoretical method – to determine the reliability and bearing capacity of berthing structure with the use of geotextile materials;
- the experimental method – to establish the effect of reinforcement on the wall and determine the most effective placement of the geotextile materials in the backfill soil.

The results of the research. In the last 20 – 30 years, an exciting and promising material called "geotextile" or "geosynthetic" appeared in the construction domain. The root "geo" indicates the field of application of these materials: they are used as reinforcing nets or waterproofing membranes in structures and buildings whose foundation is loose rock such as soil, sand, gravel mixtures, etc. "Synthetics" and "textiles" reflect the composition of materials, the method of their manufacture and appearance: fabrics, felt, films and other relatively thin, light materials of a large covering area.

Synthetic polymers give geotextiles specific favourable properties for polymers: water and frost resistance, universal corrosion resistance, low weight (density of polymers is about 1 g/cm³), and high tensile strength.

Disadvantages of polymers (such as rapid ageing under direct solar radiation (UV component), a sharp drop in strength when heated to 80°– 120°C and flammability) when used in structures where the bulk of the volume is made up of loose rocks that protect polymers from light and temperature effects, are blocked.

Currently, the term geosynthetic materials (GM) is used more often, so attention will be paid to it in the future. The field of application of geosynthetic materials is quite broad: road, hydrotechnical, underground, and nature protection construction; it is also advisable to use GM in landscape design.

The use of geosynthetic materials in construction has fundamentally changed the nature of works related to the fastening of slopes, construction of retaining walls, and road foundations. Large volumes of concrete and earthworks become unnecessary, so sand and reinforcing geogrids, geotextiles, and geolattices are used to obtain the desired result.

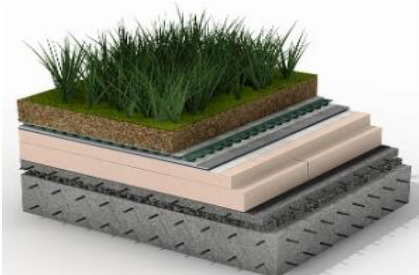


Fig. 1. Application of geotextile in environmentally friendly construction

In the case of arranging water reservoirs or storages, film geosynthetic materials, nets and, again, local soil are used. Thus, the use of geosynthetic materials has a considerable economic effect, reducing and even eliminating the use of such materials as concrete, steel, and imported natural stone and facilitating the work. All this leads to a minimum environmental intervention, making geosynthetic materials ecologically effective, which is the most crucial advantage and necessary quality these days.



Fig. 2. Application of geotextile in hydraulic engineering

GM is widely used to prevent soil erosion and protect the shores of reservoirs and their landscaping (Fig. 1). Anti-erosion mats are an alternative to traditional methods of anti-erosion protection made of concrete, stones or wooden gratings. Another significant advantage of these materials is that even before the formation of the vegetation layer, the mats prevent the occurrence of erosion processes.

In the practice of hydrotechnical engineering, GM, namely bentonite geomembranes, are used as waterproofing when installing anti-filtration curtains, dams or water walls, as well as for the organization of waterproofing screens of reservoirs, ponds, and reservoirs (Fig. 2). The use of geomembranes provides guaranteed long-term waterproofing (several tens of years), even in aggressive environments.

There are other areas of application of geosynthetic materials. When choosing one or another GM, it is necessary to

consider its properties, largely determined by the type and structure of polymers used for their production. The type of polymer the material is made of determines its resistance to temperature effects, short-term and long-term strength, resistance to ultraviolet rays, aggressive environments, etc. In addition, it is very important to strictly follow the recommendations on the production technology of works using geosynthetic materials.

As for the facilities and structure reconstruction, the use of geomaterial is very relevant. This material is easy to install and lay, it does not have a large weight, and, in terms of its characteristics, is not inferior to traditional materials. It can be used in the reconstruction of facilities in conditions of limited space or where reinforcement is required without a substantial weighting of the existing structure.

The results of experimental studies. The experimental studies were conducted to establish the effect of reinforcement on the front wall when using geomaterial located in the backfill soil and its most effective placement. Innovative geomaterial – Typar SF – was considered.

To determine the most effective placement of the geomaterial, several studies (minimum of 3 experiments in each series of studies) were carried out, such as:

1. Tray with sand and load located on the backfill surface.
2. Placement of geomaterial in 2 layers for 1/3 and 2/3 of the entire height of the wall.
3. Placement of geomaterial in 1 layer for 1/3 of the entire height of the wall.

The experimental tray has the following dimensions: length 81 cm, width 69 cm, height 48 cm. The load is located on the surface in the form of an evenly distributed load and is applied at levels of 60 kg, 120 kg, 180 kg, and 240 kg.

Sensors were calibrated before conducting experiments. Movements are measured using clock-type sensors. Graphs are drawn for 3 sensors (Fig. 3).

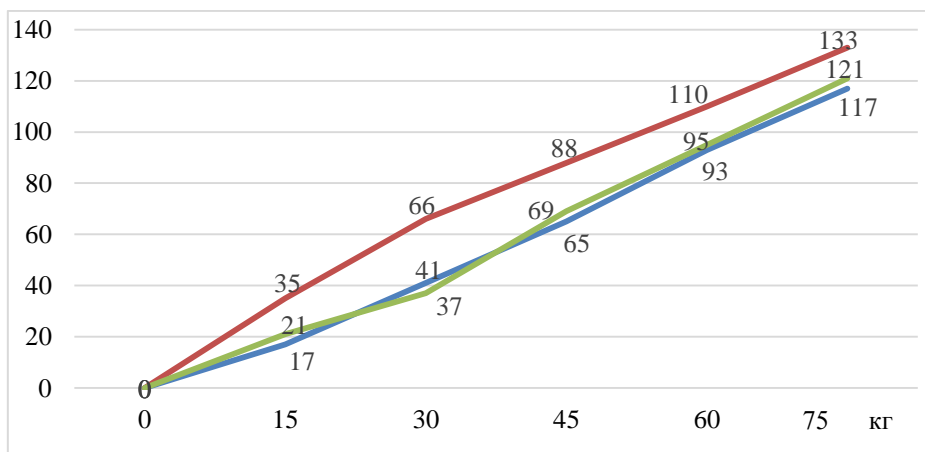


Fig. 3. Calibration curves:
 — sensor 1; — sensor 2; — sensor 3

When moves are received, a reverse operation will be performed for the loaded tray. Further, the effect of reinforcement in % and the comparison of the results are determined.

The results of experimental studies (Sensor indications and pressure of the backfill soil on the wall) depending on the placement of the geomaterial are shown in Tables (1 – 6).

Table 1 – Sensor indications without reinforcement

Sensors	Loads on the backfill surface				
	0	60	120	180	240
	Sensor indications				
Sensor 1	76	83	90	104	118
Sensor 2	76	84	93	102	115
Sensor 3	74	85	86	96	120

Table 2 – Backfill pressure without reinforcement

Backfill pressure on the wall for 3 experiments	Loads on the backfill surface				
	0	60	120	180	240
	Backfill pressure				
P1	51	55	58	67	76
P2	37	42	48	55	63
P3	48	54	55	61	74

Table 3 – Sensor indications with the laying of one layer of geotextile 1/2H

Sensors	Loads on the backfill surface				
	0	60	120	180	240
	Sensor indications				
Sensor 1	74	84	94	106	118
Sensor 2	72	83	94	104	114
Sensor 3	59	71	77	87	97

Table 4 – Backfill pressure with the laying of one layer of geotextile 1/2H

Backfill pressure on the wall for 3 experiments	Loads on the backfill surface				
	0	60	120	180	240
	Backfill pressure				
P1	50	55	61	68	76
P2	34	42	49	56	63
P3	40	46	50	55	61

Table 5 – Sensor indications with the laying of 2 layers of geotextile 1/3H i 2/3H

Sensors	Loads on the backfill surface				
	0	60	120	180	240
	Sensor indications				
Sensor 1	75	79	91	105	119
Sensor 2	74	79	89	97	108
Sensor 3	48	56	88	98	109

Table 6 – Loads with laying of 2 layers of geotextile 1/3Hi 2/3H

Backfill pressure on the wall for 3 experiments	Loads on the backfill surface				
	0	60	120	180	240
	Backfill pressure				
P1	50	53	59	68	76
P2	35	39	46	51	59
P3	35	39	56	62	68

Determining the effectiveness of reinforcement. Using formula (1), we determine the effectiveness of geotextile reinforcement.

$$E = \frac{P_{nr} - P_r}{P_{nr}} \quad (1)$$

P_{rn} – backfill soil pressure on the wall without geotextile reinforcement;

P_r – backfill soil pressure on the wall with geotextile reinforcement;

E – effectiveness of geotextile reinforcement.

The effectiveness of reinforcement depends on the geotextile layers and the load on the backfill soil surface, as is shown in Fig. 4, 5. The effectiveness of reinforcement is calculated as a percentage.

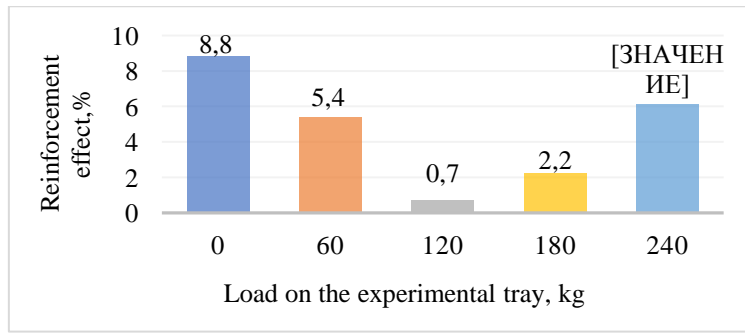


Fig. 4. Effect of reinforcement with laying of one layer of geotextile

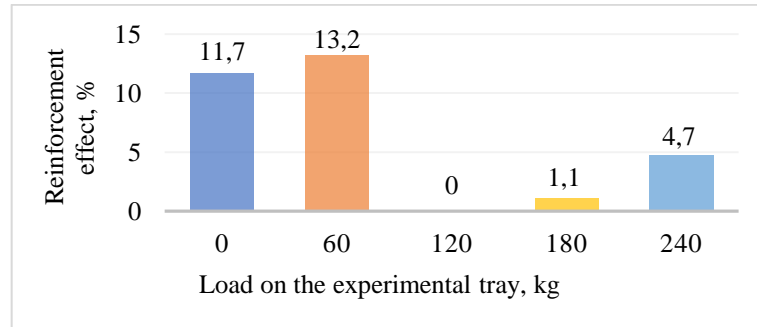


Fig. 5. Effect of reinforcement with laying of 2-layer geotextile

Thus, we can conclude:

- maximum effect of reinforcement in 2 layers was obtained from the beginning of the load after the effect decreased;
- after the penetration of soil particles into the pores of the geomaterial, the reinforced layer begins to work as a composite, which leads to an increase in the effect of reinforcement.

Calculation results in the software complex Plaxis 2D. Plaxis is a simple and convenient package of ordinary element programs for performing calculations of complex geotechnical projects in modern construction. In the process of two-dimensional and three-dimensional calculations available in Plaxis programs, stresses, deformations, and strength (stability) in complex geotechnical systems are determined, considering the joint work of engineering structures and their interaction with the soil at the construction, operation and reconstruction stages. The calculation scheme, with a uniformly distributed load, was created in the Plaxis 2D package. Fig. 6-8 presents the calculation results showing how the load located on the surface of the backfill is distributed along the wall.

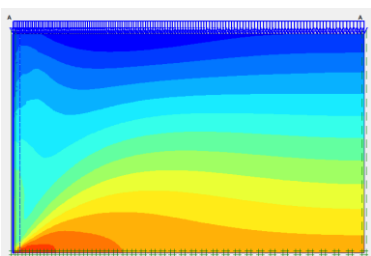


Fig. 6. Load distribution on the wall without reinforcement

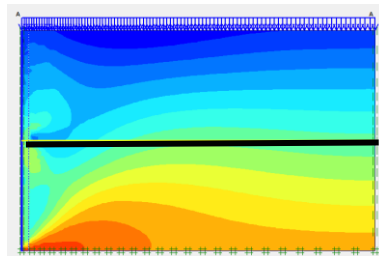


Fig. 7. Load distribution on the wall with laying of one layer of geotextile

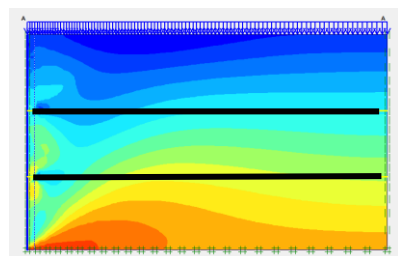


Fig. 8. Load distribution on the wall with laying of 2-layer geotextile

In order to find out that the software complex Plaxis can be used for the correct calculation of full-scale structures, the results (on a tray in the laboratory and simulated in the program) must be identical or have acceptable differences.

For this purpose, a soil tray was simulated in the software complex and loaded with a similar load. It was reinforced and the forces in the front wall were determined.

The backfill soil characteristics in the software complex and the backfill of the soil tray are similar. A comparison of the results was performed. The results of the conducted studies are presented in Fig. 9.

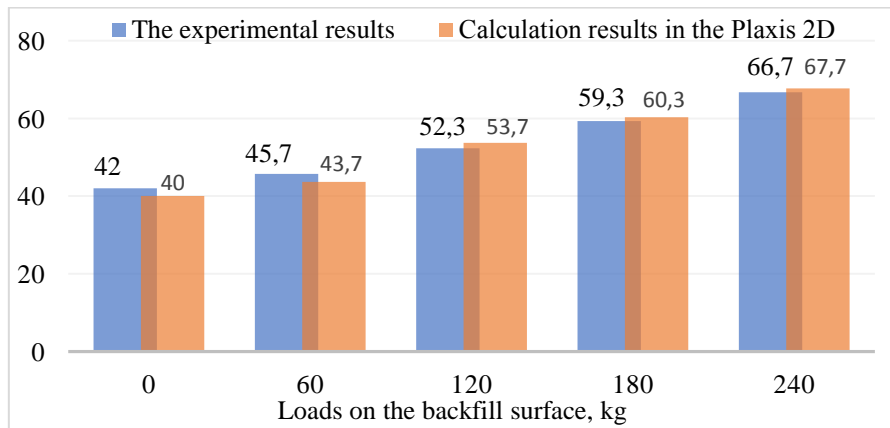


Fig. 9. Comparison of the obtained results. Backfill pressure with the laying of one layer of geotextile 1/2H

A comparison of results have shown that the differences in results is about 5%. Given these results, it can be concluded that the use of the Plaxis 2D software complex for calculations of full-scale structures using innovative geotextile material in the future is feasible.

The calculation results of the berthing structure in the software complex Plaxis 2D. The research results have been applied to a corner-type structure with a buttress to estimate the correctness of the obtained results and to analyze the preliminary reconstruction options.

The mentioned structure has been calculated in the software complex Plaxis 2D. Stability coefficients have been determined depending on the location of the geomaterial. The research results are presented in Fig. 10-12.

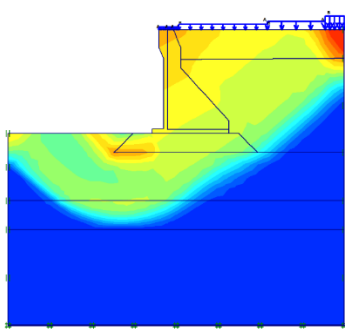


Fig. 10. Sliding surfaces without reinforcement. The stability coefficient is 1.19

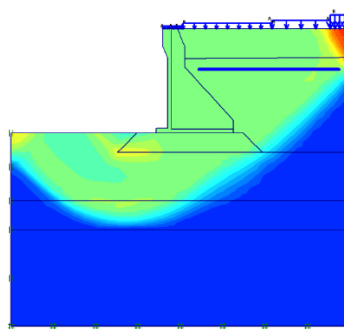


Fig. 11. Sliding surfaces when reinforcement in one level. The stability coefficient is 1.25

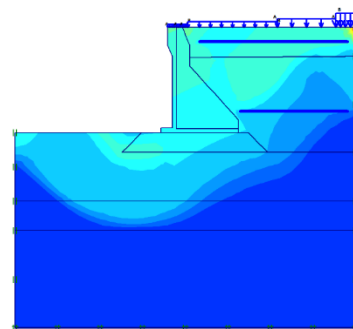


Fig. 12. Sliding surfaces when reinforcement in two levels. The stability coefficient is 1.37

A comparison of calculation results shows that the stability coefficient significantly increases with using geotextile materials for reinforcement. When reinforcement is in two layers horizontally, plastic and elastic-plastic zones practically do not appear behind the structure. This makes it possible to increase the load on the surface of the berthing structure without reducing operational reliability.

Possible reconstruction options of a corner-type structure. The study's results applied to a corner-type structure with a buttress to analyze the preliminary reconstruction options. Possible reconstruction options of a corner-type structure when geomaterial is located in 1 level at 1/3 of the entire height of the wall and 2 levels at 1/3 and 2/3 are shown in Fig. 13.

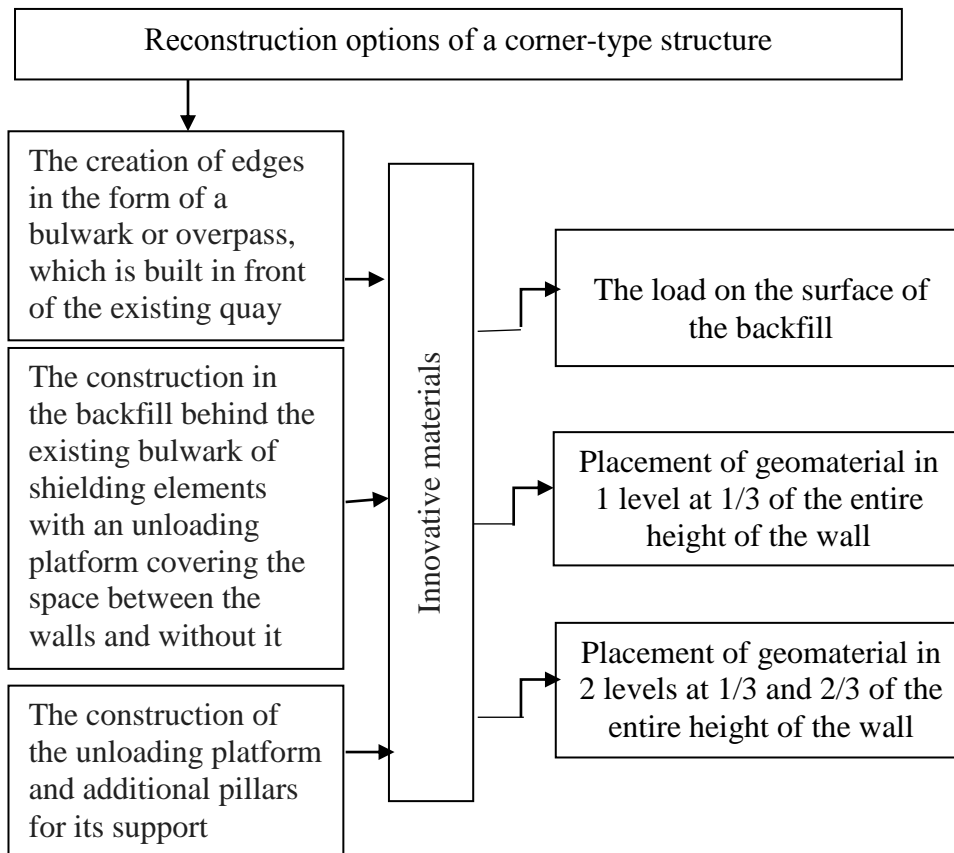


Fig. 13. Possible reconstruction options of a corner-type structure

Conclusions:

– when using geotextile materials in the backfill soil the stability coefficient of the structure increases. This reduces the forces and deformations in the elements of the structure. Using geotextile material leads to a reduction in material consumption and cost. The research has confirmed the reduction of pressure in the backfill soil;

– the research result has confirmed that geotextile material reduces pressure in the backfill soil. Experiments have shown that the reinforcement of the backfill soil behind the structure with geotextile material is a promising type of reinforcement or "strengthening" of structures. Vertical reinforcement in the form of two screens showed that displacements decreased without load;

– the calculations have shown a lower efficiency in the reinforcement of the backfill soil in comparison with the results of the experiments. This is because the Plaxis does not consider the force of friction of the soil against the vertical wall of the structure. However, even with this shortcoming, the calculation results showed a reduction of pressure on the wall of the structure;

– innovative projects make it possible to solve complex problems of attracting financial resources for modernization. The value of such projects lies in the fact that using modern methods in the field of hydraulic engineering with geotextile materials significantly reduces the necessary capital investments. This leads to cheaper construction or reconstruction of existing structures while increasing the reliability and the strength of the objects.

References

- [1] Rozporiadzhennia kabineta ministriv Ukrainy Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi strategii Ukrainy na period do 2030 roku № 430. (2018, Traven 30). Kyiv: Verkhovna Rada Ukrainy. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-D1%80#Text>.
- [2] Rozporiadzhennia kabineta ministriv Ukrainy Pro zatverdzhennia strategii rozvytku morskyykh portiv Ukrainy na period do 2038 roku № 548. (2013, lypen). Kyiv: Verkhovna Rada Ukrainy. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/548-2013-%D1%80#Text/>.
- [3] R.H. Basset, "Reinforcing earth slopes and embankments", *Conf. ASCE Symp. of earth Reinforcement*, Pittsburg, pp.122 – 130, 1987.
- [4] K.Z. Andrawes, M.M., McGown, "The Finite Element Method of Analysis Applied to Soil -Geotextile Systems", *Proc. of the 2nd int. conf. of geotextile*, Las Vegas, USA, vol. 2, pp. 690 –700, 1982.
- [5] Yu.V. Feofilov, "Kharakter raspredelenii napryazhenii v massive gorizontavno armirovannogo grunta (ploskaya zadacha)", *Osnovaniya i fundamenti v slozhnikh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh*, pp. 41– 44, 1985.
- [6] M.F. Drukovanyi, V.S. Tokariiev, "Klasyfikatsiia metodiv armuvannia hruntiv", *Budivelni Konstruktsii*, vol. 55, pp. 36 – 37, 2001.
- [7] Yu.B. Balashov, "Metodyka vyznachennia nesuchoi zdatnosti slabykh osnov z urakhuvanniam reolohichnykh parametriv hruntu", *Avtodorozhnyi kompleks Ukrainy v suchasnykh umovakh: problemy i shliakhy rozvytku*, pp. 88 – 92, 1998.
- [8] Yu.B. Balashov, "Modelnie ispitaniya ustoichivosti armirovannikh osnovanii dorozhnykh nasipei", *Prydniprovskiyi naukoviyi visnyk*, vol. 101(168), pp. 105 – 106, 1998.
- [9] O.A. Ruban, "Matematicheskoe modelirovanie napryazhenno – deformirovannogo Sostoyaniya "podrobotannikh" armogruntovykh sooruzhenii", *Zaliznychnyi transport Ukrainy*, vol. 1, pp. 6 – 7, 2000.
- [10] V.A. Guido, K.G. Dongand, A.V. Sweeny, "Comparison of geogrid and geotextile reinforced earth slabs", *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 23(1), pp. 435 – 440, 1986.
- [11] K.H. Khing, B.M. Das, V.K. Puri, S.C. Yen, "Foundation on strong sand underlain by weak clay with geogrid at the interface", *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 13, Issue 3, pp. 199 – 206, 1994.
- [12] T. Yetimoglu, Wu JTH, A. Saglamer, "Bearing capacity of rectangular footing on geogrid-reinforced sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 120(12), pp. 2083 – 2099, 1994.
- [13] R.D. Espinoza, J.D. Bray, "An integrated approach to evaluating single – layer reinforced soils", *Geosynthetics International*, vol. 2(4), pp. 723 – 739, 1995.
- [14] M.T. Adams, J.G. Collin, "Large model spread footing load tests on geotextile reinforced soil foun – dations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 123(1), pp. 66 – 72, 1997.
- [15] P.L. Bourdeau, M.E. Harr, R.D. Holtz, "Soil-fabric interaction an analytical model", *International Conference on Geotextiles*, Las Vegas, U.S.A., 1982, pp. 387 – 391.
- [16] J.P. Giroud, A. Ah-Line, R. Bonaparte, "Design of unpaved roads and trafficked areas with geogrids", *Symposium on Polymer Grid Reinforcement*, London, 1984, pp. 116 – 127.
- [17] S.V. Bugaeva, A.A. Baranova, "Ispolzovanie geomaterialov v gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh", *Sudnoplavstvo: perezhennia, tekhnichni zasoby, bezpeka: Materialy naukovo-tekhnichnoi konferentsii*. Odesa: ONMA, 2012, pp. 18 – 20.
- [18] S.V. Bugaeva, A.A. Baranova, "Raschet kompozitnogo materiala «grunt-geomaterial» s uchetom formi yacheiki", *Effektivnaya infrastruktura i logistika na transporte v stranakh Yugo-Vostochnoi Yevropi: XVII Mezhdunarodnaya konferentsiya po transportu i logistike Tranzitnii potentsial Ukraini*. Odessa, 2014, pp. 122 – 124.

**ЗАСТОСУВАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В СУЧАСНОМУ
ГІДРОТЕХНІЧНОМУ БУДІВНИЦТВІ**

¹**Хонелія Н.Н.**, к.т.н., доцент,
khonelianatela@gmail.com, ORCID: 0009-0000-4323-0293

¹**Бугаєва С.В.**, к.т.н., доцент,
s.bugaeva2408@gmail.com, ORCID: 0009-0000-3805-3720

¹**Лопатін К.О.**, аспірант,
SLodessa80@gmail.com, ORCID: 0009-0002-0794-8366

Одеський національний морський університет
вул. Мечникова, 34, Одеса, 65029, Україна

Анотація. Визначення тиску армованого ґрунту засипки на причальну споруду відіграє важливу роль. Навантажувальна спроможність причальних гідротехнічних споруд залежить від багатьох факторів: їх віку, режиму експлуатації, зміни характеристик матеріалів конструкцій, ґрунтів основи та засипки в часі та ін. У деяких випадках з часом вона значно знижується, а в інших – значно зростає. Іноді навантажувальна спроможність споруд у перший період експлуатації збільшується, а надалі знижується. У ряді випадків навпаки – на початковий період знижується, а згодом – зростає. Тому встановити фактичне значення навантажувальної спроможності споруд лише теоретичним шляхом не є можливим через недостатність інформації про технічний стан на даному етапі експлуатації, а також складності виявлення дійсної картини взаємодії споруди та ґрунту основи. Це завдання може бути вирішене лише в результаті комплексних експериментальних та теоретичних досліджень.

Аналіз особливостей причального фронту морських портів України свідчить про застосування, головним чином, споруд які зведені, в основному, у період після Другої світової війни. При цьому найпоширенішими конструктивними рішеннями були пальові естакади, включаючи облямівки й больверки зі шпунта. Однак є споруди кутового типу з контрфорсом, які були побудовані в минулому та потребують модернізації й реконструкції. Частка у загальному причальному фронті таких споруд складає приблизно 10%. Важливими й актуальними напрямками подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення і розвиток причального фронту морських портів України, є розробка і впровадження в практику портового гідротехнічного будівництва вдосконалених методів будівництва і реконструкції існуючих причальних споруд.

У статті розглянуто методи визначення ефекту армування геотекстильним матеріалом, розроблено моделі, що враховують не лише структуру та характеристики геотекстильних матеріалів, а і їхнє розташування в ґрунтовому масиві. Таким чином, модель враховує як параметри ґрунту засипки, так і характеристики геотекстильного матеріалу та глибину їх розташування. Описано результати експериментальних досліджень з встановлення ефекту армування на лицьову стінку при застосуванні геотекстильних матеріалів, розташованих в засипці. Обґрунтовано можливість підвищення надійності та несучої здатності причальних споруд при реконструкції з використанням геотекстильних матеріалів у ґрунтовій засипці. Для оцінки коректності отриманих результатів виконано порівняння експериментальних даних з даними, отриманими в програмному комплексі Plaxis. На основі одержаних результатів досліджень виконано аналіз попередніх варіантів реконструкції для споруди кутового типу з контрфорсом.

Ключові слова: причальна споруда, реконструкція, геотекстильний матеріал, ефект армування, споруди кутового типу з контрфорсом.

Стаття надійшла до редакції 11.10.2024

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS COEFFICIENT OF DECENTRALIZED VENTILATION SYSTEMS WITH HEAT RECOVERY

¹**Hulai B.**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
bogdan.i.gulai@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-6951-6994
¹**Kuz O.**, postgraduate student,
oleh.f.kuz@lpnu.ua, ORCID: 0009-0007-5235-2517
¹**Bundzylo V.**, postgraduate student,
volodymyr.p.bundzylo@lpnu.ua, ORCID: 0009-0005-4256-4191
¹*Lviv Polytechnic National University*
12, S. Bandery Str., Lviv, 79000, Ukraine

Abstract. This article is devoted to studying of decentralized supply-exhaust ventilation systems (DSEVS) with heat recovery, which are an important element for ensuring energy-efficient air exchange in modern hermetic buildings. The problems of natural ventilation, which in modern conditions cannot provide an adequate level of air exchange without heat loss, especially in winter and summer, have been studied, and the effectiveness of mechanical ventilation systems has been substantiated. A comparison of centralized and decentralized systems is made, highlighting the advantages of decentralized systems in terms of ease of installation, space saving and the possibility of installation in already renovated premises. In the work, three samples of DSEVS equipped with copper heat exchangers, which provide high heat transfer, were analysed. The main goal of the study was to identify the strengths and weaknesses of the existing devices and develop recommendations for their improvement, taking into account the climatic features of the regions of Ukraine and Europe.

On the basis of the conducted research, the results of the efficiency of each of the systems, which are sufficiently close to each other, were obtained. This, accordingly, was expected, since the heat exchangers of these systems are made of the same material – copper. During the tests, the need for better tightness of each of the systems was determined, which can improve the results of their efficiency in the future. At the same time, the results of these studies may vary depending on the determination of the real air consumption of each of the devices, as well as the mass balance of the supply and exhaust air flows, which may differ.

The study confirms the effectiveness of countercurrent systems working on simultaneous inflow and extraction as optimal solutions for maintaining a comfortable and energy-efficient microclimate. The obtained results can be directed to the optimization of the design of the DSEVS and the possibility of operation of such systems in combination with natural or other mechanical ventilation systems.

Keywords: decentralized ventilation systems, recuperator, energy saving, air quality, air exchange.

Introduction. Today, people spend a significant amount of time indoors, so indoor air quality has a significant impact on their health. However, this indicator has deteriorated over the past twenty years. The main reason for this is the growing demand for energy conservation and energy efficiency, which has made buildings much more airtight. As a result, natural air exchange is no longer sufficient to ensure optimal ventilation. This has increased the urgency of developing energy-efficient supply and exhaust ventilation systems for buildings. One of the possible solutions is the creation and implementation of decentralized supply and exhaust ventilation systems (DSEVS) using recuperative or regenerative heat exchangers.

Therefore, testing existing decentralized ventilation devices, identifying their strengths and weaknesses, and developing recommendations for the production of a new energy-saving regenerative heat exchanger, taking into account the climatic conditions of the regions of Ukraine and Europe, is an important and urgent task, since such devices play a key role in ensuring the

energy efficiency of buildings and improving air quality in the modern environment.

The relevance of this study is due to the advantages of decentralized ventilation systems, which allow to effectively solve the issues of air exchange in the conditions of modern construction and operation of buildings [1-3]. The main advantages are their relatively low cost, which makes such systems more affordable compared to centralized installations. In addition, the compactness of decentralized systems minimizes the required space for their installation, as they do not require the use of air ducts, grilles, and other shaped elements of the air duct network. Another important advantage is the ability to install in buildings that have already been renovated, as such systems do not require significant changes in the construction or design of the premises. Thus, decentralized ventilation systems are one of the options for providing ventilation of premises [4, 5].

Analysis of recent research and publications. The analysis of recent publications covers various aspects of the use of decentralized ventilation systems, research on their efficiency and comparison with other types of ventilation systems, for example, by pressure generation method, purpose, design, etc. Particular attention is paid to the efficiency index, which provides an accurate analysis of energy efficiency.

Natural ventilation ensures air exchange due to natural physical processes - the difference in temperature and pressure inside and outside the building. However, its efficiency varies significantly depending on the season. In summer, when the temperature difference between the room and the outside environment is minimal, air exchange is significantly reduced, which often leads to a decrease in the required air exchange. In winter, on the contrary, a sharp temperature difference increases the intensity of ventilation, which leads to excessive heat loss and increased heating costs [6].

Fluctuations in the efficiency of natural ventilation create an additional burden on other ventilation systems, especially in sealed spaces that require stable air exchange to maintain a healthy microclimate. In such conditions, natural ventilation is not able to provide an adequate level of air quality control, especially in modern buildings with a high level of energy efficiency [7, 8].

These disadvantages make mechanical ventilation systems, especially decentralized ones, a more effective solution, as they provide stable and controlled air exchange regardless of external conditions, maintaining both comfort and energy efficiency of the room.

There are two main types of mechanical ventilation systems: centralized and decentralized. Centralized ventilation systems are complex and multi-component engineering solutions. Their installation takes considerable time and requires many additional elements, such as air ducts, deflectors, grilles, adapters, cabling and wiring products, and fasteners, which significantly increases the total cost of the project and installation work [9, 10]. Since air ducts accumulate dust over time, their maintenance is quite laborious and requires regular intervention to ensure cleanliness and proper operation. In residential premises, centralized ventilation ducts are usually installed in ceiling structures, which often leads to the need for repair work after their installation and lowering of the ceiling structure. In case of a ventilation unit breakdown, a specialist is required to disconnect the ventilation system from the air ducts, which creates additional costs for the user.

In today's built environment, most newly constructed or modernized buildings are equipped with a full or partial mechanical ventilation system, ranging from hybrid options and full supply and exhaust systems to localized, customized ventilation solutions. Ventilation systems are key to maintaining proper indoor air quality and energy efficiency in buildings. Modern design approaches, especially in developed countries, rely heavily on mechanical ventilation systems to improve indoor air quality while minimizing energy losses. In well-insulated buildings located in temperate regions, such as Europe or Ukraine, the combination of infiltration and ventilation can account for about 50% of total heat loss. Studies [11] have shown that the implementation of energy-efficient measures, such as heat recovery systems, increased insulation, and optimized operating modes, can reduce energy consumption by about 50% for both heating and cooling. These measures not only contribute to energy saving, but also meet the increased demand for thermal comfort, which is important in the modernization and reconstruction of buildings. Thus, mechanical ventilation systems with heat recovery are one of the key strategies for optimizing energy consumption and ensuring high quality of the indoor environment, especially in well-insulated buildings where heat loss through natural ventilation is a significant problem [12-14].

The most efficient among mechanical ventilation systems are counterflow type of DSEVSs, which are equipped with two fans and provide simultaneous air supply and exhaust (Fig. 1). Such a design allows achieving a high level of energy efficiency, since the supply air is heated or cooled by the exhaust air, minimizing heat loss, and, at the same time, has a stable efficiency compared to reverse-type systems. The systems discussed in this article are equipped with heat exchangers made of the same material – copper.

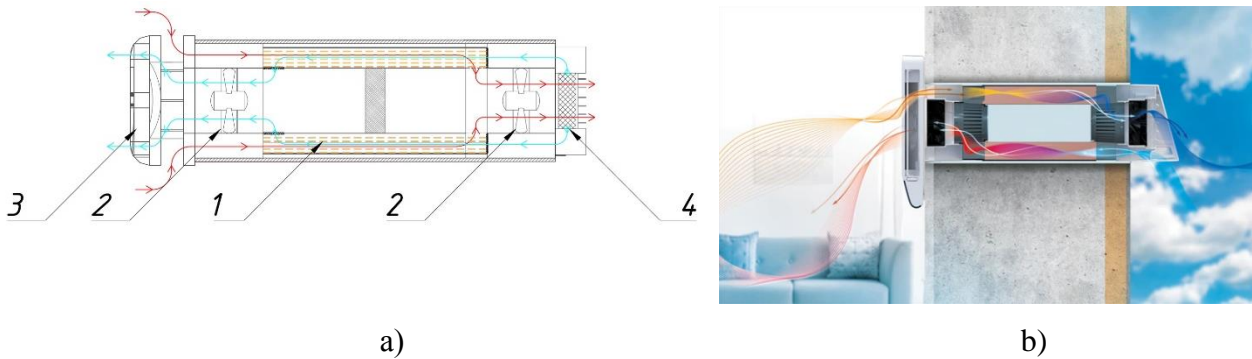


Fig. 1. DSEVS of a countercurrent type:

- a – schematic diagram of the countercurrent type of the DSEVS based on the Prana-150 Standard construction; b – the principle of operation of the countercurrent type of the Vents Breeze 160-E Smart; 1 – heat exchanger; 2 – fans; 3 – air inflow and exhaust grille from the room; 4 – air exhaust and inflow grille from the outside

Purpose and objectives. The purpose of this work is to improve the design of decentralized ventilation systems by preliminary analysis based on research on the efficiency of existing decentralized ventilation devices, to identify the strengths and weaknesses of the presented systems, to create recommendations for manufacturers of these systems, considering the climatic conditions of the regions of Ukraine, and to determine the direction of further research.

Materials and methods of the study. The tests were carried out on a test bench (Fig. 2), consisting of two separate rooms separated by a partition, in which different microclimate parameters are maintained. The study was carried out for three samples of DSEVS: Prana-150 Standard, Klimatronic 160 Basic, and Vents Breezy 160-E Smart (Fig. 3-5), which contained all components and were installed according to the manufacturer's passports and instructions [15-17].

The mass flow rates were measured simultaneously in steady-state conditions. The studies were conducted at a voltage of 230 V, which was maintained by voltage stabilizers throughout the experiment.

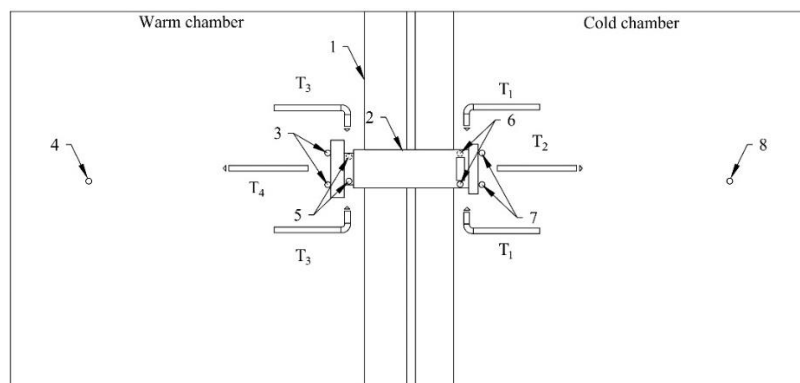


Fig. 2. Schematic of the experimental setup:

- 1 – partition wall; 2 – DSEVS; 3 – supply air temperature sensors after recovery T_4 ; 4 – air temperature and humidity sensor in the warm chamber; 5 – exhaust air temperature sensors before recovery T_3 ; 6 – supply air temperature sensors before recovery T_1 ; 7 – exhaust air temperature sensors after recovery T_2 ; 8 – temperature and humidity sensor in the "cold" chamber



Fig. 3. DSEVS research process for Vents Breeze 160-E Smart



Fig. 4. DSEVS research process for Klimatronik 160 basic



Fig. 5. DSEVS research process for Prana 150 Eco Life

The main purpose of these studies is to determine the efficiency under the same testing conditions at minimum, average and maximum air flow rates according to the data in the technical data sheets of the devices.

Based on the above, the efficiency of the DSEVS is determined by the formula:

$$\eta = \frac{(T4 - T1)}{(T3 - T1)} \times 100. \quad (1)$$

In the course of this work, DSEVS were tested under close-to-nature conditions, under which DSEVS are exposed to the entire set of factors of both external temperatures and the internal microclimate of the room. The list of temperature and humidity control systems is given in Table 1.

All measurements were performed using a set of measuring equipment (Table 2) connected to a data logger. The parameters of the temperature and humidity conditions are given in Table 3.

Table 1 – Heating and cooling devices

Equipment	Premises	
	"Warm" chamber	"Cold" chamber
Cooling	Air conditioner Cooper&Hunter CH-S12FTXF2-NG	Cooling unit Bitzer AA-BK-64/2EES-3Y
	–	Air cooler Eco GCE 312F8 ED
Heating	Convactor heater Noveen CH9000 LCD SMART	–

Table 2 – Measuring devices

Measured variable	Measuring device
Dry thermometer temperature	Resistive temperature sensors PT 100
Wet thermometer temperature	Digital temperature, humidity and atmospheric pressure sensor
Static pressure difference	Piezoresistive pressure sensor
Relative humidity	Digital temperature, humidity and atmospheric pressure sensor
Data management	Data acquisition system
Electricity consumption	Wattmeter ammeter voltmeter Intertek 3680W

Table 3 – Parameters of temperature and humidity conditions

Parameters	Premises	
	"Warm" chamber	"Cold" chamber
Temperature, °C	19-21	6-8
Humidity, %	45-55	65-75

Ensuring the internal air temperature in the warm and cold chambers is taken in accordance with DSTU (National Standard of Ukraine) EN 13141-8:2019 "Ventilation in buildings. Performance testing of components/products for residential ventilation. Part 8: Performance testing of nonchannel supply and exhaust ventilation units (including heat recovery) for mechanically driven ventilation systems designed for a single room" (EN 13141-8:2014, IDT) [18].

Research results. Based on the statistical processing of the results of experimental studies (Table 4), a graphical dependence of the DSEVS efficiency on changes in air flow was constructed (Fig. 6).

Table 4 – DSEVS Research results

Parameter	Designations	Unit of measurement	Values of indicators for DSEVS		
			Vents Breezy 160-E Smart	Klimatronik 160 Basic	Prana 150 Eco Life
Efficiency factor	η	%	78-56	89-53	88-52
Consumption*	N	W*h	4.4-9.2	3.4-22.5	3.2-15.6
Air flow rate** (according to the manufacturer's data sheet)	L	m ³ /h	15-57	20-70	5-52

* – Electricity consumption is based on measurements made during the research;

** – air flow rate is indicated in the measurement range, without taking into account the maximum air flow rate (boost mode).

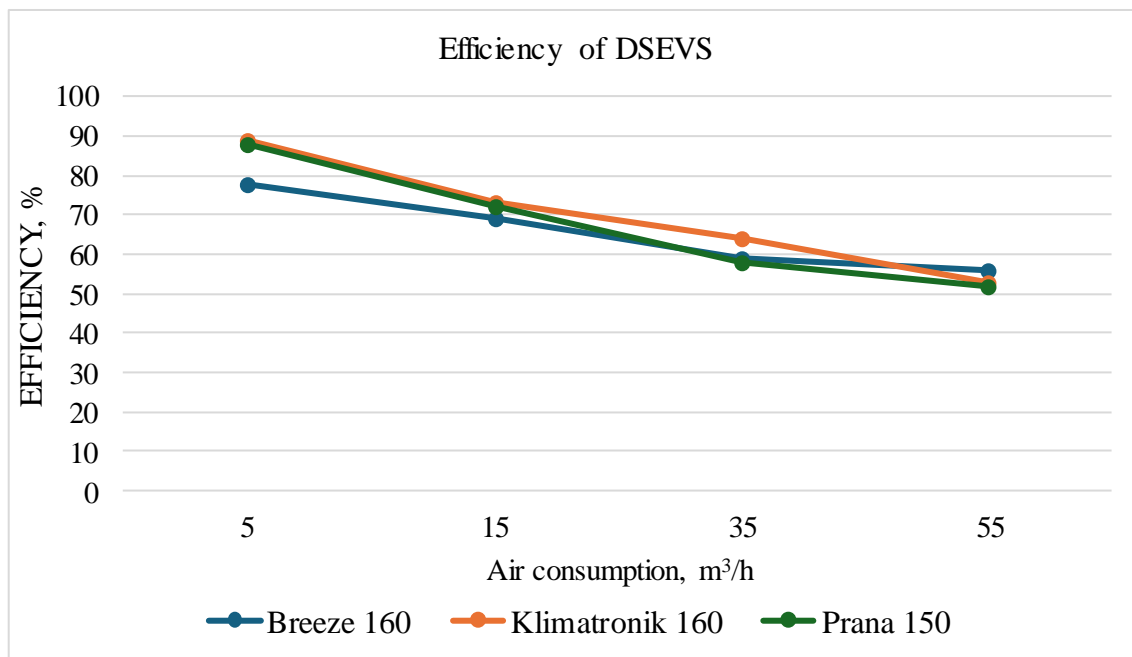


Fig. 6. Efficiency of decentralized supply and exhaust ventilation systems (DSEVS) with heat recovery

As the analysis of the results shows, the efficiency of the studied DSEVS is quite similar, since all models show a decrease in efficiency with an increase in air flow. The highest efficiency over the entire range of air flow rates, especially at low air flow rates, was shown by the Klimatronik 160 Basic system, while the lowest efficiency among the three models at each stage was recorded for the Vents Breezy 160-E Smart system. With an increase in air flow rate to 55 m³/h, the efficiency of all three models approaches 60-65%, leveling the differences between them.

Conclusions. The article presents the results of studies of the efficiency of decentralized ventilation systems with heat recovery. Particular attention was paid to ensuring the same experimental conditions, including the microclimate parameters of the "warm" and "cold" chambers. Based on the research, the results of the efficiency of each of the systems were obtained, which turned out to be quite close due to the use of heat exchangers made of the same material – copper.

However, the efficiency of a heat exchanger depends not only on the material, but also on many other factors: material thickness, heat transfer surface area, aerodynamic characteristics of air flows, balance of supply and exhaust air, etc. The tests also identified the need to increase the tightness of the systems, which could potentially improve their efficiency.

The studies found that one of the systems demonstrated the highest efficiency. However, the study found that the exhaust air flow rate was higher than the supply air flow rate, which affected the results. This indicates the need to further determine the actual supply and exhaust air flow rates through the system for each device more accurately.

The results obtained can be used to optimize the design of decentralized ventilation systems with recovery, their integration with natural or mechanical ventilation systems, and to develop recommendations for manufacturers. Further research should be directed at improving heat exchangers, in particular with regard to their design characteristics, and adapting systems to the specific climatic conditions of different regions.

After conducting tests and analyzing the results, the directions and prospects for further research have been formed, which will help to better define the detailed problems of these DSEVS designs and formulate steps for their optimization. The priority of the next research is to determine the actual air flow rates of each DSEVS, and if the results differ from the data specified in the technical passport, it is necessary to repeat the efficiency tests at the same air flow rates and the balance of air masses of supply and exhaust air. After that, the prospect of further research is to test with changes in pressure in each of the chambers and obtain repeated results.

References

- [1] R.Sh. Mansurov, A.R. Mansurov, T.A. Rafalska, "Enerhozberihaiuchi tekhnolohii ventyliatsii zhylykh budivel iz zastosuvanniam detsentralizovanykh rekuperatoriv", *Enerho- ta resursoefektyvnist malopoverkhovykh zhytlovykh budivel: mat-ly konf.* 2017, pp. 142-151.
- [2] V.O. Mileikovskiy, H.M. Klymenko, "Analitychni doslidzhennia enerhetychnoi efektyvnosti pryrodnoi ventyliatsii", *Ventylatsiia, osvittennia ta teplohazopostachannia*, vol. 20, pp. 39-45, 2016.
- [3] I.Iu. Bilous, "Otsiniuvannia enerhoefektyvnosti budivli v umovakh dynamichnoi zminy kharakterystyk seredovyshcha", dis. ... k-ta tekhn. nauk: 05.14.01, Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut imeni Ihoria Sikorskoho". Kyiv, 2019.
- [4] R.Sh. Mansurov, T.A. Rafalskaya, "Energy saving technologies of the decentralized ventilation of buildings", *Problems of Thermal Physics and Power Engineering (PTPPE-2017): mat-ly konf.* Journal of Physics: Conference Series, vol. 891, 2017, pp. 1-9. doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012156.
- [5] E. Niemierka, P. Jadwiszczak, "Experimental investigation of a ceramic heat regenerator for heat recovery in a decentralized reversible ventilation system", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 146, pp. 106899, 2023. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106899.
- [6] O.F. Kuz, B.I. Hulai, "Suchasni tendentsii rozvytku detsentralizovanykh system ventyliatsii", *Tradytsii ta novi naukovy stratehii u Tsentralnii ta Skhidnii Yevropi : mat-ly VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii.* Zaporizhzhia, AA Tandem, 2024, pp. 76-88.
- [7] S. Zhukovskiy, "Efektyvnist hravitatsiinoi ventyliatsii prymishchen", *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, vol. 17, no. 7, pp. 142-147, 2007.
- [8] Ye.P. Yuzkova, H.S. Ratushniak, "Perevahy y nedoliky system ventyliatsii ta shliakhy yikh vdoskonalennia", *VNTU*, pp. 1-3, 2021. [Online]. Available: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/37297/12776-45644-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Accessed on: November 29, 2024.

- [9] A. Merzkirch, S. Maas, F. Scholzen, D. Waldmann, "Field tests of centralized and decentralized ventilation units in residential buildings – Specific fan power, heat recovery efficiency, shortcuts and volume flow unbalances", *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 376-383, 2016. doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.008.
- [10] D.V. Prytyka, S.L. Andrukh, "Ventyliatsiia yak zasib enerhozberezhennia", *Vseukrainska naukova konferentsiia studentiv ta aspirantiv, prysviachena Mizhnarodnomu dniu studenta: mat-ly konf.* Sumy, 2020. pp. 183.
- [11] N. Buyak, et al., "Dynamic interdependence of comfortable thermal conditions and energy efficiency increase in a nursery school building for heating and cooling period", *Energy Elsevier*, vol. 283, pp. 1-14, 2023. doi.org/10.1016/j.energy.2023.129076.
- [12] V. Savin, V. Zhelykh, "Recuperators as an important element for energy efficiency in building ventilation systems", *Construction of Optimized Energy Potential*, vol. 12, no. 1, pp. 71-78, 2023. doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.08.
- [13] D.I. Vakulenko, V.O. Mileikovskiy, "Modeliuvannia efektyvnosti teploutylizatsii reheneratyvnoho provitriuvacha za riznymi pidkhodamy", *Ventyliatsiia, osvittennia ta teplohapostachannia*, vol. 41, pp. 32-38, 2022.
- [14] T. Pekdogan, A. Tokuç, M. Akif Ezan, T. Basaran, "Experimental investigation of a decentralized heat recovery ventilation system", *Journal of Building Engineering*, vol. 35, pp. 1-13, 2021. doi.org/10.1016/j.job.2020.102009.
- [15] "Detsentralizovani pryplyvno-vytiashni systemy ventyliatsii z rekuperatsiieiu tepla Prana: Tekhnichniy pasport prykladu modelei Prana-150, Prana-200G, Prana-200C". [Online]. Available: <https://prana.ua/products-cat/recuperators/>. Accessed on: November 29, 2024.
- [16] "Detsentralizovani pryplyvno-vytiashni systemy ventyliatsii z rekuperatsiieiu tepla Venst Brizi 160E: Tekhnichniy pasport prykladu modelei Brizi 160 E". [Online]. Available: <https://vents-shop.com.ua/provitryuvach-vents-breezy-160-e/>. Accessed on: November 29, 2024.
- [17] "Detsentralizovani pryplyvno-vytiashni systemy ventyliatsii z rekuperatsiieiu tepla Klimatronik 160 Beisik: Tekhnichniy pasport prykladu modelei Klimatronik 160 Beisik". [Online]. Available: <https://klimatronik.com.ua/>. Accessed on: November 29, 2024.
- [18] DSTU EN 13141-8:2023. Ventyliatsiia v budivliakh. Vyprovuvannia ekspluatatsiinykh kharakterystyk komponentiv/vyrobiv dlia ventyliatsii zhytlovykh prymishchen. Chastyna 8. Vyprovuvannia robochykh kharakterystyk nekanalnykh ustanovok pryplyvno-vytiashnoi ventyliatsii (okhopliuiuchy reheneratsiieiu tepla) (EN 13141-8:2022, IDT), 2023. [Online]. Available: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106357. Accessed on: November 29, 2024.

**АНАЛІЗ КОЕФІЦІЄНТУ КОРИСНОЇ ДІЇ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ
ВЕНТИЛЯЦІЇ З РЕКУПЕРАЦІЄЮ ТЕПЛОТИ**

¹Гулай Б.І., д.т.н., доцент,
bogdan.i.gulai@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-6951-6994

¹Кузь О.Ф., аспірант,
oleh.f.kuz@lpnu.ua, ORCID: 0009-0007-5235-2517

¹Бундзило В.П., аспірант,
volodymyr.p.bundzylo@lpnu.ua, ORCID: 0009-0005-4256-4191

¹Національний Університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79000, Україна

Анотація. Дана стаття присвячена дослідженню децентралізованих припливно-витяжних систем вентиляції (ДПВСВ) із рекуперацією тепла, які є важливим елементом для забезпечення енергоефективного повітрообміну в сучасних герметичних будівлях. Вивчено проблематику природної вентиляції, яка в сучасних умовах не може забезпечити належний рівень повітрообміну без втрат тепла, особливо взимку та влітку, і підведено до обґрунтування ефективності механічних систем вентиляції. Проведено порівняння централізованих та децентралізованих систем, підкреслюючи переваги останніх у простоті монтажу, економії простору та можливості встановлення в уже відремонтованих приміщеннях. У роботі аналізуються три зразки ДПВСВ, оснащені мідними теплообмінниками, що забезпечують високу теплопередачу. Основна мета дослідження – виявлення сильних та слабких сторін наявних пристроїв і розробка рекомендацій для їх удосконалення, враховуючи кліматичні особливості регіонів України та Європи. Аналіз отриманих даних свідчить про досить близькі показники ефективності досліджуваних систем. Такий результат був прогнозований, оскільки всі системи використовують ідентичний матеріал для теплообмінників – мідь. Однак, виявлення необхідності поліпшення їхньої герметичності відкриває перспективи для подальшого підвищення їх ефективності. Варто зазначити, що точні значення ефективності можуть змінюватися в залежності від реальних умов експлуатації, зокрема, від фактичного споживання повітря кожним пристроєм та балансу повітряних потоків у системі. Дослідження підтверджує ефективність протиточних систем, що працюють на одночасний приплив і витяжку, як оптимальних рішень для підтримки комфортного та енергоефективного мікроклімату. Отримані результати дослідження можна застосувати для удосконалення конструктивних особливостей децентралізованих вентиляційних систем з функцією рекуперації тепла з урахуванням специфіки різних регіонів. Це дозволить ефективніше інтегрувати їх із природними або механічними системами вентиляції, а також розробити більш досконалі рекомендації для виробників такого обладнання.

Ключові слова: децентралізовані системи вентиляції, рекуператор, енергозбереження, якість повітря, повітрообмін.

Стаття надійшла до редакції 29.11.2024

MODELLING OF THERMAL PROCESSES IN A HYBRID SOLAR COLLECTOR

¹**Shapoval S.P.**, Doctor of Engineering, Professor,
stepan.p.shapoval@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-4985-0930

¹**Pryshliak Y.V.**, graduate student,
yurii.v.pryshliak@lpnu.ua, ORCID: 0009-0001-0511-2568

¹**Ivashchyshyn F.O.**, Doctor of Engineering, Senior researcher,
fedir.o.ivashchyshyn@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-6919-5841

¹**Bundzylo V.P.**, graduate student,
volodymyr.p.bundzylo@lpnu.ua, ORCID: 0009-0005-4256-4191

¹*Lviv Polytechnick National University*
12 Bandery St., Lviv, 79000, Ukraine

Abstract. One of the main tasks of the modern energy sector is to provide heat supply to energy-efficient buildings through the use of renewable energy sources, including solar energy. Since modern buildings have limited space for installing solar collectors, the integration of solar heaters into the structures of external walls and facades of buildings is a promising direction.

The article presents the results of studies of thermal processes in a heat supply system with a hybrid solar collector, in which a liquid coolant circulates. The system consists of a finned heat exchanger and a storage tank. In order to determine the feasibility of the practical application of such a design, a hybrid solar collector has been developed, which can be used to effectively model and solve the tasks before starting full-scale research.

Computer modelling of thermal processes in the SolidWorks environment was carried out, with the help of which a series of sequential experiments were created to determine temperature changes at the outlet of the heat exchanger and in the battery tank under different operating conditions. Based on the data obtained, graphs of temperature distribution, amount of thermal energy and changes in efficiency during the study were constructed.

Based on the results, conclusions have been drawn about improving the efficiency of the system with a hybrid solar collector and the possibilities of its further use in solar heating systems for energy-efficient buildings. These solutions make it possible to integrate such a solar collector into the external protection of the building.

The authors provide data indicating that the efficiency of a system with a hybrid solar collector is influenced by its design features, meteorological factors, pollution and the angle of the collector.

However, to fully confirm the results, further field experimental studies are needed to compare theoretical and experimental data. This work lays the groundwork for further optimisation of hybrid solar collector designs and their widespread implementation in solar heating systems.

Keywords: thermal processes, hybrid solar collector, solar heat supply systems, finned heat exchanger, modelling of thermal processes, efficiency.

Introduction. Nowadays the increasing demand for energy-efficient technologies and renewable energy sources makes the use of solar collectors increasingly relevant. Hybrid solar collectors, which combine the functions of generating thermal and electrical energy, represent one of the most promising solutions for enhancing the efficiency of energy systems. A key aspect of developing such systems is ensuring their stable and efficient operation, which requires a detailed analysis of thermal processes within the collector.

Thermal process modeling enables the study of interactions among various components of a hybrid solar collector, such as the absorber, heat carrier, and cooling elements, contributing to the optimization of design and an increase in the system's efficiency. It is also essential to consider the

influence of external factors, such as solar radiation intensity, ambient temperature fluctuations, and thermal losses. All these factors significantly affect the performance of the collector and require thorough investigation to develop effective engineering solutions.

Analysis of recent research and publications. The analysis of recent publications covers various aspects of hybrid solar collector utilization and the study of thermal process modeling in heliosystems incorporating such collectors. Particular attention is devoted to mathematical modeling, which enables precise analysis of the energy efficiency and performance of solar thermal systems.

One of the primary directions in solar energy utilization is the integration of solar collector elements into building architectural forms [1] and the exploration of passive solar energy use in construction, particularly through the application of hybrid solar collectors in building structures [2, 3]. These systems enable the efficient use of solar energy for space heating, hot water production, and backup power supply, which are essential for hybrid systems [4, 5].

Energy supply systems where hybrid solar collectors serve as the main components are also being studied separately. These studies highlight the key advantages and disadvantages of using such collectors in energy-efficient buildings [6, 7].

At present, to enhance heat transfer efficiency in hybrid systems, researchers are focusing on the design features and key thermal parameters of solar collectors, which include aluminum grooved tubes [8].

The rise in the number of buildings with glass facades has spurred the combination of large transparent structures with solar collectors. Additionally, such hybrid solar collectors are equipped with photovoltaic panels, and a finned heat exchanger is installed in the housing, where a heat carrier circulates [9]. Researchers are also actively studying solar collectors integrated with building coverings and roofs, where absorber tubes are attached to the roofing material [10, 11].

Despite the large number of traditional systems, there are solutions where the material of the sun-receiving surface is corrugated carbon-graphite canvas. The main advantage is the lightness of the structure, with a fairly large area of the adsorber [12].

To assess the feasibility of using specific elements in a solar thermal system, computer modeling is employed. Such solutions lead to optimization, which, in turn, significantly enhances the efficiency of these systems and reduces energy consumption costs [13, 14].

Hybrid solar thermal collectors can also be utilized for preparing drying agents. The analysis of such thermal processes employs 3D modeling within the collector, allowing improvements in drying processes for agricultural systems [15].

A review of publications has shown that modeling thermal processes in systems with hybrid solar collectors holds great potential, particularly regarding their integration into energy-efficient buildings. However, further field experimental studies are needed to fully confirm the results, allowing for a comparison of theoretical and experimental data.

The aim of the article is to improve the design of a hybrid solar collector, develop and implement a computer model to study thermal processes using SolidWorks software for further analysis and optimization of its design. The article focuses on exploring the capabilities of computational modeling for detailed studies of heat transfer, reduction of thermal losses, and enhancement of the solar collector's efficiency. Additionally, it aims to provide recommendations for engineers in the field of renewable energy.

Research Methodology. To address the tasks set, computer modeling was applied using SolidWorks software. A detailed model of the heat supply system was created, featuring a fine mesh breakdown to analyze the temperature distribution.

Presentation of Main Material. To address the task in the field of energy-efficient construction, a design for a hybrid solar collector has been proposed. This design integrates elements of a solar collector and a window (Fig. 1).

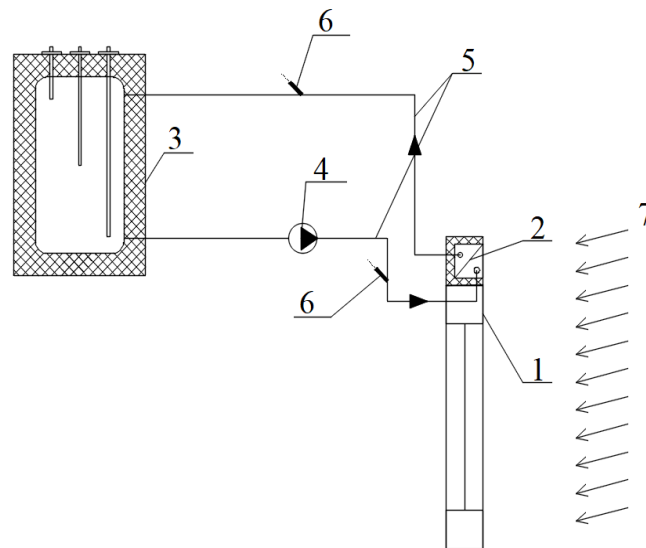


Fig. 1. Installation diagram:

1 – hybrid solar collector housing; 2 – finned heat exchanger; 3 – heat accumulator; 4 – pump installation location; 5 – pipelines; 6 – temperature sensors; 7 – solar radiation direction

A computer model of this solar collector was developed to investigate its thermal characteristics, featuring a ribbed heat exchanger integrated into the upper part that operates alongside a heat accumulator (Fig. 2). This model, at the stage of theoretical research, facilitates the efficient resolution of several tasks before practical application.

The studied system shown in Fig. 2a consists of a solar window housing, which incorporates a ribbed heat exchanger, as well as an accumulator tank designed for storing the collected thermal energy. The ribbed structure of the heat exchanger increases the heat exchange surface area, enhancing the efficiency of heat transfer from the absorber to the liquid heat carrier circulating in the system. The accumulator tank is equipped with thermosensors to record temperature changes during the experiment.

During the simulation in the SolidWorks environment, the thermal properties of the materials, the liquid heat carrier flow rate, and the intensity of solar radiation were taken into account. The obtained results were recorded and entered into a table depending on the specified radiation intensity. Temperature change graphs in the heliocollector and accumulator tank were also plotted.

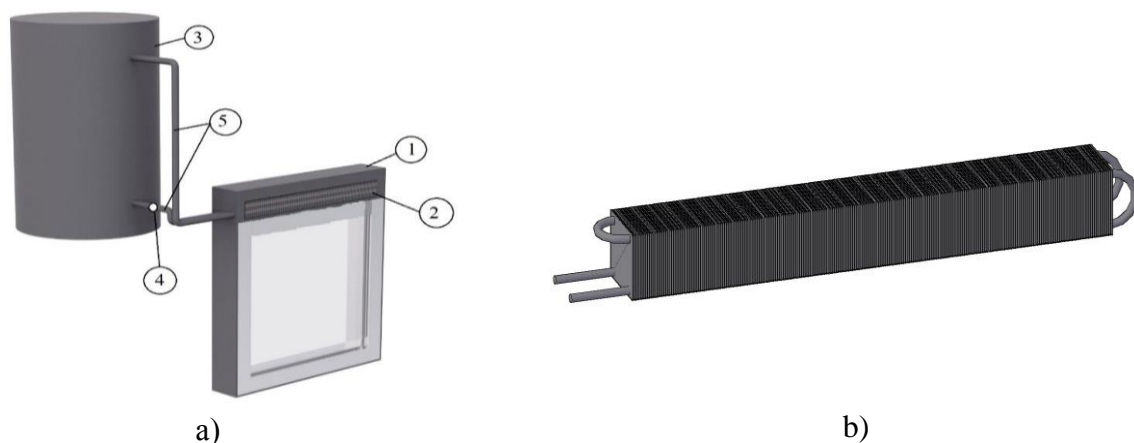


Fig. 2. Computer model of a solar collector:

a – model of the hybrid solar collector; b – finned heat exchanger; 1 – housing of the hybrid solar collector; 2 – finned heat exchanger; 3 – heat accumulator; 4 – location of the pump; 5 – pipelines

In Fig. 3, a temperature increase to 22.5 °C can be observed in the lower part of the frame. Additionally, convective flows around the window structure are visible, with an average temperature of approximately 22 °C. Heat accumulation in the housing is also evident, with the temperature rising to 23 °C. The upper part of the open absorber reached a temperature of over 23 °C, while the lower part heated up to 22 °C.

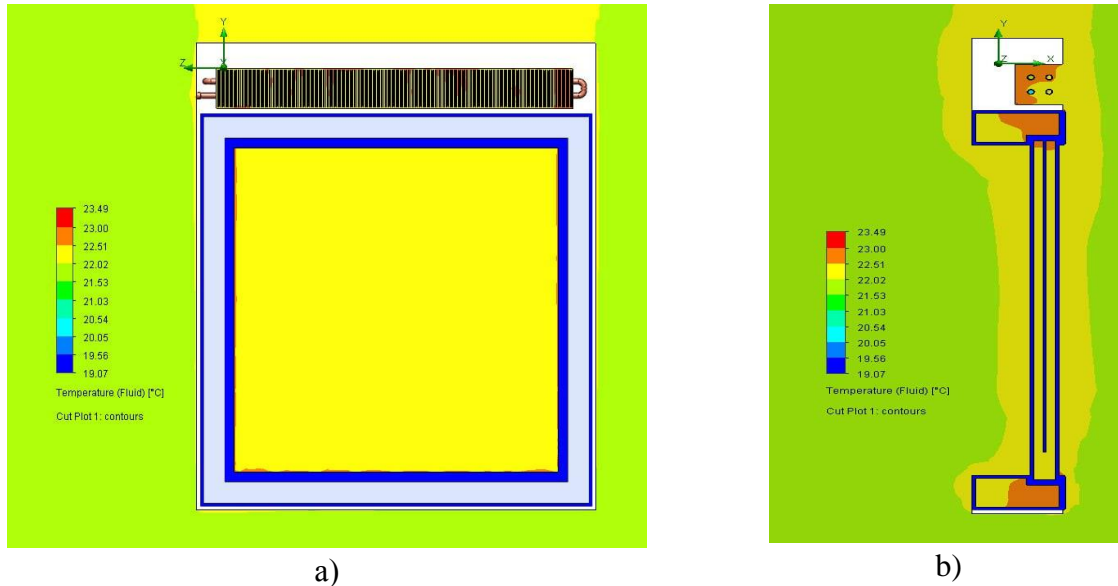


Fig. 3. Temperature distribution:
a – in front of the solar window; b – in section

Fig. 4 showed that the lack of transparent protection in front of the heat sink causes significant convective heat loss, which generally reduces the efficiency of the solar collector and reduces the temperature of the coolant at the outlet. This encourages further technical improvements to this design.

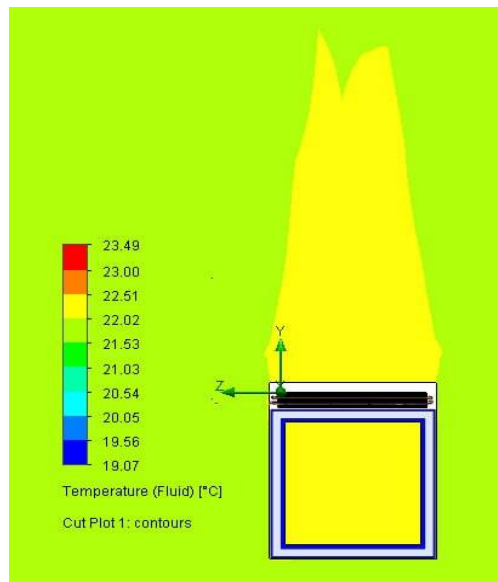


Fig. 4. Convective flows around the studied model

From Fig. 5, it is evident that the outlet temperature of the heliocollector increased from 19°C to 22.3°C between the 5th and 40th minutes, with minimal temperature changes thereafter.

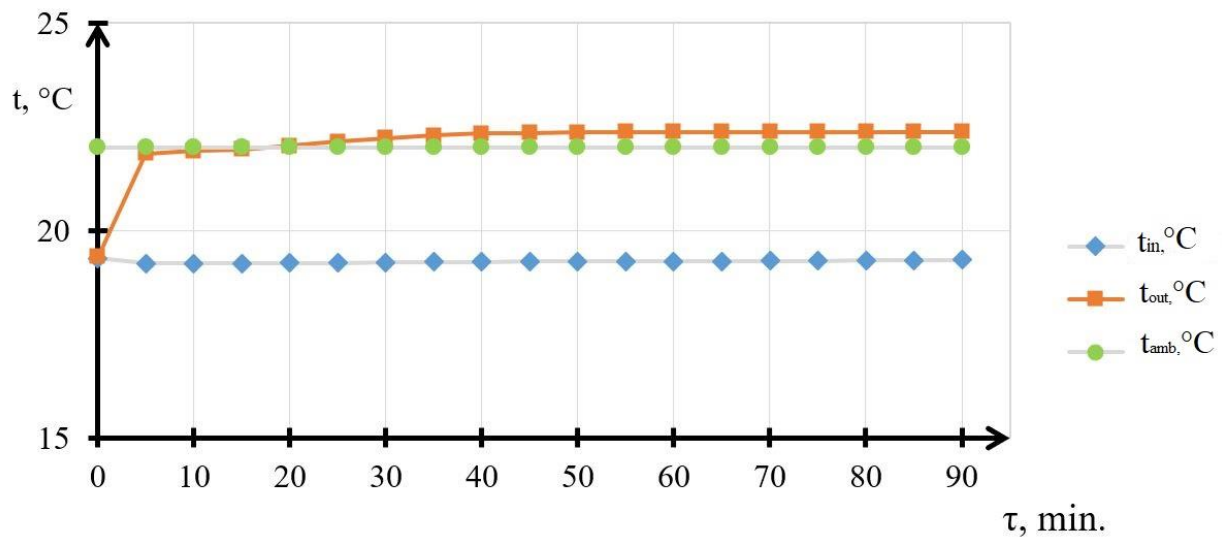


Fig. 5. Heat carrier temperatures at the inlet and outlet of the heliocollector and ambient temperature throughout the experiment

Fig. 6 shows that during the modeling, the temperature in the accumulator tank remained steady at 19°C up to the 40th minute, after which it gradually increased to 21°C. The graph illustrates the temperature distribution within the tank based on the positions of the installed sensors.

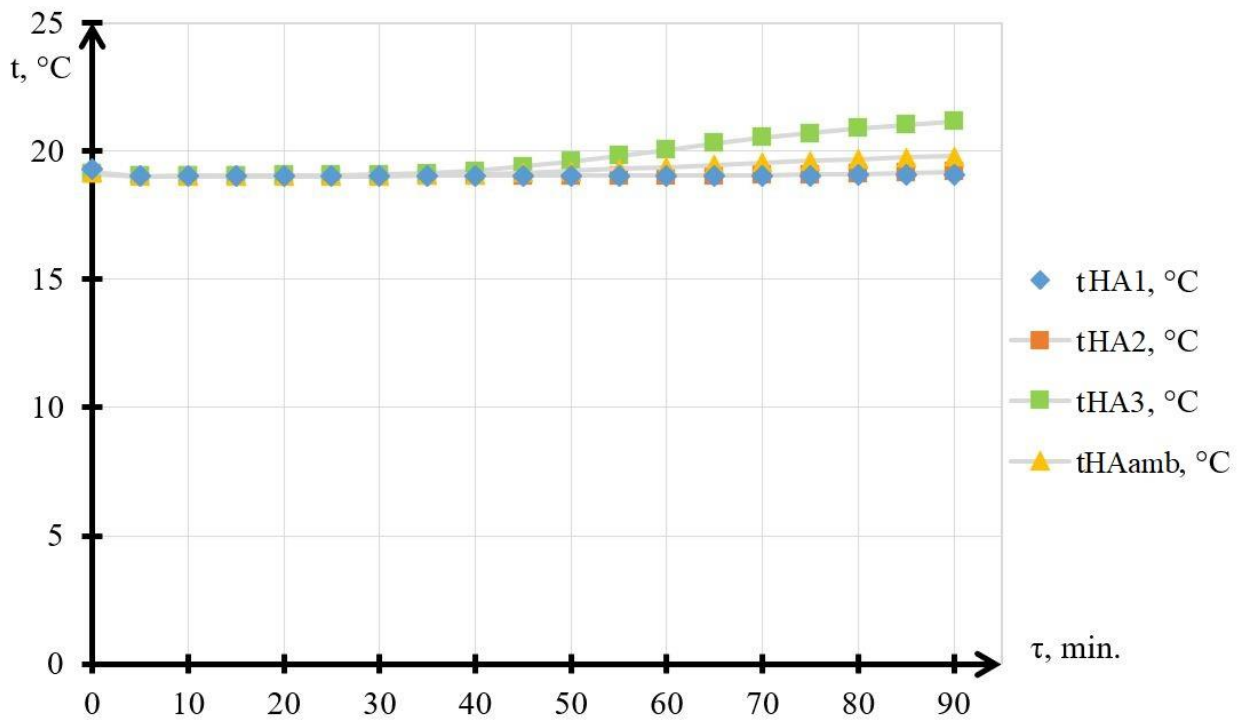


Fig. 6. Temperature change in the heat accumulator depending on the heating time

During the simulation, the instantaneous power of the solar collector Q_{sk} increased during the first half of the experiment (Fig. 7), and then stabilized.

On Figure 8, it can be observed that the efficiency coefficient of the hybrid solar window increased from 72% at the 5th minute to 85% at the 50th minute, and then changed insignificantly. Overall, the average efficiency coefficient of the studied solar collector was 0.82.

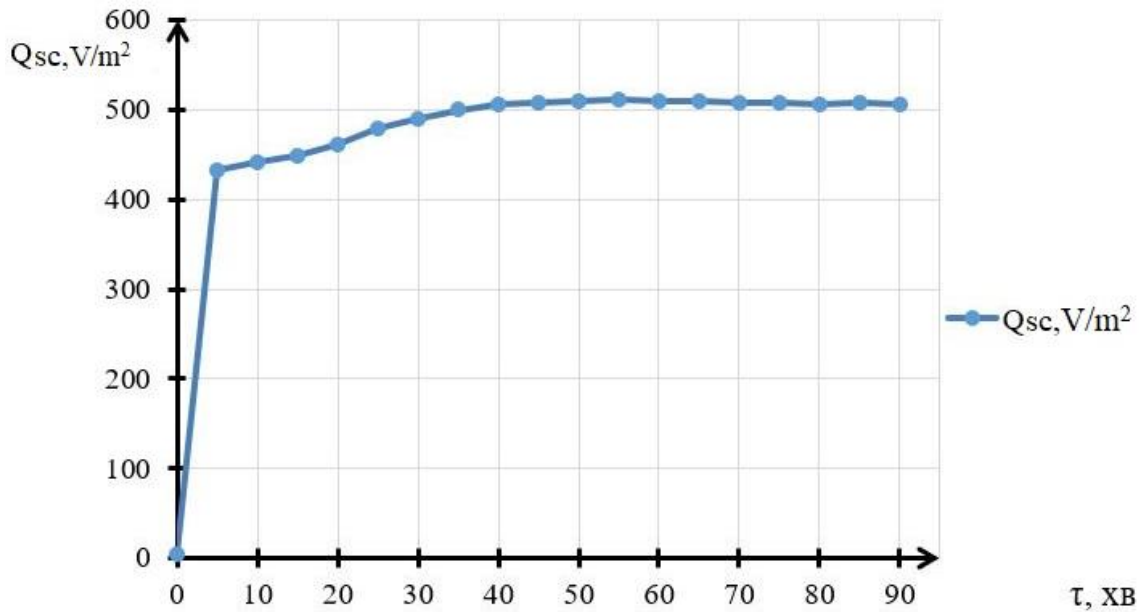


Fig. 7. Instantaneous power of the solar collector

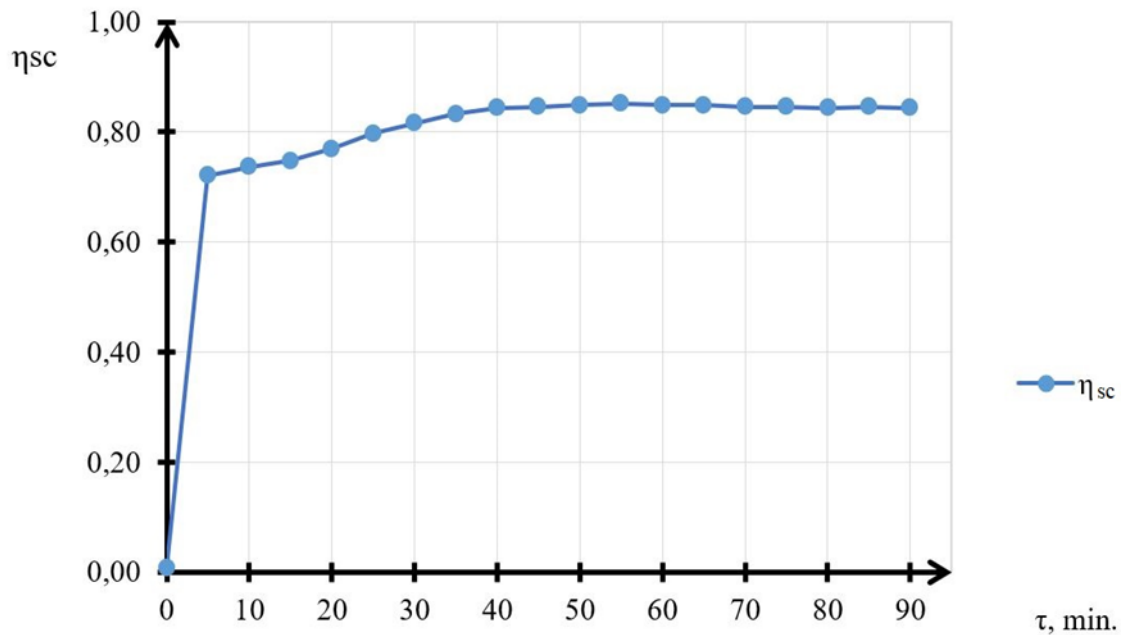


Fig. 8. Change in solar collector efficiency during the experiment

Conclusions:

This article presents the results of modeling thermal processes in a hybrid solar collector. The main attention was paid to theoretical approaches and computer modeling, which allowed to evaluate the operation of the hybrid solar collector under various operating conditions.

Based on the measures taken, it was shown that the efficiency of using a solar window with a built-in finned heat exchanger for collecting solar energy increased. The use of an accumulator tank allows for the effective storage of thermal energy for further use in heat supply systems. The analysis of temperature fluctuations in the heat accumulator proved that the use of a finned heat exchanger provides more uniform heating of the coolant in the system. The simulations also showed that the average coolant temperature at the outlet of the hybrid solar collector was about 22°C, and the maximum was 22.37°C. In the heat accumulator, the average temperature was 19.31°C, and in the upper part - 21.15°C. As for the instantaneous power, it was 511 W/m². The average efficiency was 0.82, and the maximum during the experiment was 0.85.

The research yielded results that can be aimed at optimizing the design of a hybrid solar collector with a finned heat exchanger and the possibility of integrating such a collector with other energy sources to increase the overall efficiency of the solar heating system.

References

- [1] Ye.P. Davydenko, "Pasyvne vykorystannia soniachnoi enerhii v arkhitekturnykh formakh", *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi*, no. (8), pp. 107–112, 2016.
- [2] I.I. Venhryn, Enerhoefektyvni heliosystemy intehrovani v svitloprozori konstruktsii budivel: diss... kand. tekhn. nauk, Natsionalnyi Universytet «Lvivska politekhnikha», 2022.
- [3] S.P. Shapoval, "Vykorystannia soniachnoi teplovoi enerhii za rakhunok kombinovanoho heliovikna", *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi*, no. (9), pp.250-253, 2017.
- [4] L.A. Weinstein, K. McEnaney, E. Strobach, Yang, S., B. Bhatia, L. Zhao, Y. Huang, J. Loomis, F. Cao, S.V. Boriskina, Z. Ren, E.N. Wang, G.A. Chen, "Hybrid Electric and Thermal Solar Receiver", *Joule*, no. 2(5), pp. 962-975, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.02.009>.
- [5] Y.-J. Jun, K.-S. Park, Y.-H. Song, "A study on the structure of Solar/Photovoltaic Hybrid system for the purpose of preventing overheat and improving the system performance", *Solar Energy*, no.(230), pp.470-484, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.019>
- [6] S.P. Shapoval, B.I. Hulai, M.Ye. Kasynets, Yu.V. Pryshliak, "Systema teplozabezpechennia budivel na osnovi hibrydnykh soniachnykh kolektoriv", *Ekolohiia. Resursy. Enerhiia: bahatofunktsionalni eko – ta enerhoefektyvni, resursozberihaiuchi tekhnologii v arkhitekturi, budivnytstvi ta sumizhnykh haluziakh: robocha prohrama ta tezy dopovidei VI Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury*, pp. 69–70, 2023.
- [7] S. Shapoval, M. Kasynets, B. Gulai, Yu. Prishlyak, "Building heat supply system based on hybrid solar collectors", *Theory and Building Practice*, no. 5(2), pp. 55–60, 2023. <https://doi.org/10.23939/jtbp2023.02.055>
- [8] D.V. Kozak, "Teplotekhnichni kharakterystyky kombinovanoho soniachnoho kolektora na osnovi aliuminiievykh kanavchatykh teplovykh trub", diss... kand. tekhn. nauk, Natsionalnyi Tekhnichniy Universytet Ukrainy «Kyivskiy politekhnichniy instytut imeni Ihoria Sikorskoho», 2018.
- [9] I. Venhryn, "Doslidzhennia soniachnykh kolektoriv, intehrovanykh v konstruktsiiu sklianoho fasadu budivli/sporudy: neobkhidnist ta osoblyvosti", *Theory and Building Practice*, no. 1(1), pp. 38-46, 2019. <https://doi.org/10.23939/jtbp2019.01.038>.
- [10] O. Voznyak, N. Spodyniuk, I. Antypov, E. Dudkiewicz, M. Kasynets, O. Savchenko, S. Tarasenko, "Efficiency Improvement of Eco-Friendly Solar Heat Supply System as a Building Coating", *Sustainability*, no. 15(3), no. 2831, 2023. <http://www.mdpi.com/journal/sustainability/ DOI: 10.3390/su15032831>.
- [11] O.M. Pona, Pidvyshchennia efektyvnosti kombinovanoi systemy teplopostachannia z heliopokrivleiu: diss... kand. tekhn. nauk, Natsionalnyi Universytet «Lvivska politekhnikha», 2018.
- [12] O.V. Pryimak, P.O. Pasichnyk, "Doslidzhennia teploviddachi absorbera soniachnoho povitropidihrivacha vyhotovlenoho z hofrovanoho vuhlehrafitovoho trykotazhnoho polotna", *Visnyk Kyivskoho Natsionalnoho Universytetu tekhnologii ta dyzainu. Serii: Tekhnichni nauky*, no (1). pp. 85–91, 2016. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkntud_2016_1_12.
- [13] S. Mysak, S. Shapoval, H. Matiko, "Simulation of hybrid solar collector operation in heat supply system", *Energy Engineering and Control Systems*, no 9(2), pp. 61–68, 2023. <https://doi.org/10.23939/jeeecs2023.02.061>.
- [14] D.A. Chyrin, V.F. Irodov, "Matematychni ta kompiuterne modeliuвання systemy teplopostachannia vid soniachnykh plivkovykh kolektoriv z teplovym nasosom", *Vcheni zapysky TNU im. V.I. Vernadskoho*, no. 31(70), pp. 135-139, 2020.

<https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/22>.

- [15] V.V. Satsiuk, Yu.V. Bulik, O.S. Dubytskyi, N.O. Tolstushko, "Doslidzhennia protsesu pryhotuvannia sushylnoho ahenta u soniachnomu teplovomu kolektori iz vykorystanniam 3d-modeliuvannia", *Silskohospodarski mashyny*, no. (42), pp.100–105, 2020. <https://doi.org/10.36910/acm.vi45.405>.

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ГІБРИДНОМУ ГЕЛІОКОЛЕКТОРІ

¹**Шаповал С.П.**, д.т.н, професор,
stepan.p.shapoval@lpnu.ua, ORCID: 0000-0003-4985-0930

¹**Пришляк Ю.В.**, аспірант,
yurii.v.pryshliak@lpnu.ua, ORCID: 0009-0001-0511-2568

¹**Іващишин Ф.О.**, д.т.н., г.н.с.,
fedir.o.ivashchyshyn@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-6919-5841

¹**Бундзило В.П.**, аспірант,
volodymyr.p.bundzylo@lpnu.ua, ORCID: 0009-0005-4256-4191

¹*Національний університет «Львівська політехніка»*
вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, 79000, Україна

Анотація. Одним із головних завдань сучасної енергетики є забезпечення теплопостачання енергоефективних будівель за рахунок використання відновлюваних джерел енергії, зокрема і сонячної енергії. Оскільки на зовнішніх огороженнях сучасних будівель є обмежений простір для встановлення геліоколекторів, перспективним напрямком є інтеграція сонячних нагрівників у конструкції зовнішніх стін і фасадів будівель.

У статті наведено результати досліджень теплових процесів у системі теплопостачання з гібридним геліоколектором (ГГК), в якій циркулює рідинний теплоносій. У своїй конструкції дана система містить ребристий теплообмінник та бак-акумулятор. Для того, щоб визначити доцільність практичного застосування такої конструкції, розроблено гібридний геліоколектор, за допомогою якого можна ефективно змоделювати та вирішити поставлені задачі перед початком натурних досліджень.

Проведено комп'ютерне моделювання теплових процесів у середовищі SolidWorks, за допомогою якого створено серію послідовних експериментів з визначення температурних змін на виході з теплообмінника та в баку-акумуляторі за різних умов експлуатації. На основі отриманих даних побудовані графіки розподілу температур, кількості теплової енергії та зміни коефіцієнта корисної дії протягом дослідження.

На основі результатів зроблено висновки щодо підвищення ефективності системи з гібридним геліоколектором та можливостей її подальшого використання у системах сонячного теплопостачання енергоефективних будівель. Ці рішення дозволяють інтегрувати такий сонячний колектор у зовнішнє захищення будівлі.

Автори наводять дані, які вказують, що на ефективність роботи системи з гібридним сонячним колектором впливають його конструктивні особливості, метеорологічні фактори, забруднення та кут нахилу колектора.

Однак для повного підтвердження результатів необхідні подальші натурні експериментальні дослідження, які дозволять порівняти теоретичні та експериментальні дані. Ця робота закладає основи для подальшої оптимізації конструкцій гібридних сонячних колекторів та їх широкого впровадження у системи сонячного теплопостачання.

Ключові слова: теплові процеси, гібридний сонячний колектор, системи сонячного теплопостачання, ребристий теплообмінник, моделювання теплових процесів, коефіцієнт корисної дії.

Стаття надійшла до редакції 16.10.2024

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 № 10
грудень 2024

Головний редактор *Вировой В.М.*

Технічний редактор *Антонюк Н.Р.*

Підписано до друку 30.12.2024 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@ogasa.org.ua

Надруковано в авторській редакції з готового оригінал-макету
в редакційно-видавничому відділі ОДАБА