

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 № 12
червень 2025**

ОДЕСА 2025

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

Випуск № 12, червень 2025

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакційна колегія:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Технічна редакція:

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

Рекомендовано до видання Вченою радою ОДАБА

Протокол № 9 від 26.06.2025 р.

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

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

ISSN 2786-6696 (print)

ISSN 2786-670X (online)



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

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

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESA STATE ACADEMY
OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

***MODERN CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE***

COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS

**Issue № 12
June 2025**

ODESA 2025

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

Issue № 12, June 2025

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Kozina Goran – Professor, University North, Croatia;

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

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

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

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

Technical editorship:

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

Recommended for publication by the Academic Board of the OSACEA

Protocol № 9, 26 June, 2025.

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

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

ISSN 2786-6696 (print)

ISSN 2786-670X (online)



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

ЗМІСТ

АРХІТЕКТУРА

Деркач С.І. Роль модернізації житлових будинків у досягненні цілей сталого розвитку: теоретичні рішення та реалізація.....	7
Ковров А.В., Гайко Г.І., Савченко І.О., Назаренко І.І., Голландер Дж. Системний аналіз альтернативних проєктних конфігурацій осьової лінії Одеського метрополітену.....	14
Намчук О.В. Історичний огляд розвитку штучного міського освітлення в м. Одеса.....	33

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

Буцька О.Л., Махінько М.М., Зезюков Д.М. Оптимізація параметрів полегшеного збірно-монолітного перекриття з полістирольними вставками.....	43
Крутій Ю.С., Перпері А.О., Величко Д.В. Розрахунок на вільні осесиметричні коливання круглих пластин, що опираються на ступенево-змінну пружну основу Вінклера.....	51
Кушнір О.М., Кушнір В.О., Гриньова І.І., Бічев І.К. Дослідження напружено-деформованого стану будівельних конструкцій, пошкоджених надзвичайними ситуаціями.....	65
Циганенко Л.А., Срібняк Н.М., Циганенко Г.М., Галушка С.А., Волков Д.Г. Вплив умов спірання структурної конструкції на характер її роботи.....	81

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

Ляшенко Т.В., Керш В.Я., Антонюк Н.Р., Хлицов М.В. Як змінюються властивості композиційного матеріалу, якщо одна з них незмінна?	95
Ткач С.В., Кровяков С.О. Вплив різних типів модифікаторів на властивості бітумів та асфальтобетонів на їх основі	102
Шевченко В.В., Непомящий О.М., Вировой В.М., Бачинський В.В. Стійкість композиційних будівельних матеріалів при впливі навколишнього середовища	114

ІНЖЕНЕРНІ МЕРЕЖІ ТА ОБЛАДНАННЯ

Гераскіна Е.А., Хоменко О.І., Хоменко А.А. Удосконалення систем утилізації теплоти зі стабілізацією теплових процесів обертових печей.....	122
--	-----

ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Менейлюк О.І., Бабій І.М., Кучеренко Л.В., Бічев І.К. Ефективність експлуатації зовнішніх систем теплоізоляції з позиції доцільності ремонтних робіт.....	129
Вимоги до оформлення статей у збірнику Сучасне будівництво та архітектура.....	136

CONTENTS

ARCHITECTURE

Derkach S.I. The role of modernization residential buildings in achieving sustainable development goals: theoretical solutions and implementation.....	7
Kovrov A.V., Haiko H.I., Savchenko I.O., Nazarenko I.I., Hollander J. System analysis of the alternative project configurations of the axial line of the Odesa subway...	14
Namchuk O.V. A historical overview of the development of artificial urban lighting in Odesa.....	33

BUILDING STRUCTURES

Butska O., Makhinko M., Zezjukov D. Optimization of lightweight precast-monolithic slabs with polystyrene void formers.....	43
Krutii Yu.S., Perperi A.O., Velychko D.V. Calculation of free axisymmetric vibrations of circular plates supported by a power-variable elastic Winkler base.....	51
Kushnir O., Kushnir V., Grynyova I., Bichev I. Investigation of the stress-strain state of building structures damaged by emergency situation.....	65
Tsyhanenko L.A., Sribniak N.M., Tsyhanenko G.M., Halushka S.A., Volkov D.G. Influence of arrangement of columns of a space grid structure on its behavior.....	81

BUILDING MATERIALS AND TECHNIQUES

Lyashenko T.V., Kersh V.Ya., Antoniuk N.R., Khlytsov N.V. How do composite material properties change with one of them unchanged?	95
Tkach S.V., Kroviakov S.O. The effect of different types of modifiers on the properties of bitumens and asphalt concrete based on them.....	102
Shevchenko V.V., Nepomiashchii A.M., Vyrovoy V.M., Bachinsky V.V. Resistance of composite building materials under the influence of the environment.....	114

UTILITY NETWORKS AND FACILITIES

Geraskina E.A., Khomenko O.I., Khomenko A.A. Improvement of heat utilization systems with thermal process stabilization in rotary kilns.....	122
--	-----

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF BUILDING PRODUCTION

Menelyuk O., Babii I., Kucherenko L., Bichev I. Efficiency of operation of external thermal insulation systems from the position of the expediency of repair work.....	129
Requirements for the articles formation in collection Modern construction and architecture.....	136

**THE ROLE OF MODERNIZATION RESIDENTIAL BUILDINGS IN ACHIEVING
SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS:
THEORETICAL SOLUTIONS AND IMPLEMENTATION**

Derkach S.I., postgraduate,
derkach.sergii@gmail.com, ORCID: 0009-0006-4380-4924
National Academy of Fine Arts and Architecture
20, Voznesens'kyi uzviz, Kyiv, 04053, Ukraine

Abstract. Modernization of residential buildings is a significant contribution to achieving sustainable development goals and solving its tasks. The housing stock of Ukraine is predominantly composed of panel housing projects and construction of the years of the Soviet Union. According to statistics, old panel residential buildings makes up more than 85% of the entire housing stock of Ukraine. Such buildings do not meet modern requirements and standards. A similar situation exists with the social housing stock in other countries, especially in countries with a heritage of Soviet panel buildings. Renovation of the old housing stock and bringing it to modern needs, requirements and standards will significantly affect the reduction of primary energy consumption and carbon emissions. Its solving sustainable development tasks in terms of inclusiveness and creating attractive living conditions in accordance with modern standards. The issue of modernization of panel residential buildings heritage of Soviet times – is considered. Gaps in this issue are identified and analyzed. The arguments for the necessity and importance of sustainable comprehensive modernization are presented using a descriptive-explanatory method. Theoretical solutions and opportunities for the implementation of complex modernization projects are presented. The importance and advantages of such a principle are noted. At the same time, a positive contribution to urban development is noted. However, obstacles and the need to overcome them are noted.

The topic of a complex approach to the modernization of the residential buildings should be given more attention. After all, partial solutions do not solve all the problems of the house and the surround space. Also its don't allow to fully achieve the goals of sustainable development, which can be provided by the complex modernization of residential buildings.

A complex approach to the modernization of residential buildings allows to create competitive conditions for new construction, prevents the degradation of old residential neighborhoods. As a result – economic and social well-being of residents; economic growth of the city. Solving a number of tasks of sustainable urban development and achieving other Goals of Sustainable Development.

Keywords: sustainable comprehensive modernization, residential neighborhoods, housing stock, mass panel residential buildings, Sustainable development, Sustainable urban development, renovation.

Introduction. Panel residential buildings designed during the Soviet period, which make up the mane part of Ukraine's housing stock, were built in blocks and neighborhoods. The situation with social housing is similar in other countries, especially in countries with a heritage of Soviet housing development. These include not only post-Soviet countries, but also some of the countries that are currently part of the European Union. Therefore, the renovation of the old housing stock is a relevant topic not only for Ukraine, but also for many other countries. Discussions of the renovation and regeneration of the housing stock in Ukraine and other countries of the world are predominantly viewed in terms of energy efficiency, in order to reduce carbon emissions into the atmosphere, and the repair of worn-out engineering parts of the building, in order to increase the value of square meters and prevent the degradation of old residential areas. The topic of sustainable comprehensive modernization is almost never considered in practice.

Analysis of Recent Research and Publications. With the adoption of the sustainable development agenda [1], views on the tasks and ways of implementing urban development have changed somewhat. In accordance with sustainable urban development, certain tasks have been set. One of them is decarbonization.

There are energy efficiency funds at the state level, the task of which is aimed at saving primary energy and reducing carbon emissions in Ukraine and some other countries [2-4]. The funds provide financial support to households, but part of the costs still fall on the co-owners of the housing.

In relation to residential buildings, this is modernization aimed at energy efficiency. According to many studies, this issue is controversial. Researchers determine not only economic disadvantage, but also raises many controversial issues regarding the reluctance of co-owners to co-finance programs, despite the significant contribution of funds, which is mostly 70% of the total cost. At the same time, the inexpediency of the programs from the point of view of investment and savings is noted. Using the example of Ukraine, this issue was considered in research, which noted the inexpediency of modernization only for energy efficiency in the presence of other technical problems, such as engineering and technical parts and components of the building [5]. Despite certain privileges for co-owners of energy-renovated buildings in Germany, researchers also note the reluctance of co-owners to co-finance energy efficiency projects. For example, this issue is considered in the work of scientists who note that the marginal costs significantly exceed the marginal benefits [6]. However, it is still necessary to accelerate the pace of regeneration of buildings with low energy efficiency in order to achieve the European Union (EU) climate change policy by 2050 [7].

A case in point is the study by Lithuanian researchers Dalia Streimikiene and Tomas Balezentis, as Lithuania, so as Ukraine, has a significant heritage of old panel houses. The study notes that although policies and measures exist to promote large-scale energy renovation, many obstacles still exist and the pace of energy renovation is still very slow, especially in new EU member states and former Soviet Union members [8].

In the USA, the approach to the renovation of residential buildings was reviewed using the example of New York City. According to the project, the need to pay attention not only to parts that require immediate or current repairs, but to comprehensive renovation when modernizing residential buildings is noted [9]. The need for the renovation of social housing is noted in a study commissioned by the European Union. The study was conducted on the example of several agglomerations in different countries, taking into account retrospective analysis. The analysis showed the need to involve residents in order to take into account the individual needs of housing being considered for modernization. Also, Aernouts. N. and colleagues note a great need for the renovation of old social housing on the example of several European countries [10].

The renovation of residential buildings should be considered on the basis of sustainable development, according all goals and the implementation of their tasks. As noted by researchers, the construction industry plays a significant role in achieving almost all sustainable development goals [11]. Therefore, sustainable modernization should solve not only the task of energy efficiency, but also bring the building to an appropriate technical condition, taking into account the tasks of sustainable development in terms of inclusiveness and sustainable urban development. Therefore, as noted in the study, the involvement of all stakeholders in the process is necessary [12].

The importance of the condition of the surround area is noted. Studies note the positive impact of landscaping when choosing a place to live and the importance of close access to green spaces [13, 14]. Environmental factors affect psychological well-being. It is necessary to design spaces that support mental and physical health. Sustainable and attractive urban environment should to meets the needs of the community [15].

Objective and Tasks. Illumination of the problems of modernization panel residential buildings in terms of achieving the goals of sustainable development. Identification of theoretical solutions and possibilities for the implementation of the tasks of sustainable urban development and the achievement of other Goals of the Sustainable development by the way of modernization of the old mass panel residential buildings.

Materials and Research Methodology. There were analyses of the current research and implemented projects that may be relevant to the modernization of the housing stock. Identified the main trends and gaps in this issue. Through a qualitative analysis of modern trends, the role of complex modernization of the mass panel residential buildings in the final goal of sustainable development is determined. Using a descriptive method, theoretical solutions and possible ways of implementing the modernization of residential buildings are presented to achieve the Sustainable urban development.

Results. Energy-efficient modernization of the housing stock is widely discussed in almost all countries of the world. A common problem exists in countries with a heritage of mass panel residential buildings from the Soviet era.

Despite significant progress in terms of creating funds to finance energy efficient modernization, obstacles remain on the way to the pace of such modernization. The main obstacle is co-financing. And this problem is not only in Ukraine with its low income and high annual credit rates, but also in other European countries.

The larger the modernization project, the greater the costs, but also the greater the benefits in the future.

Sustainable modernization should be a comprehensive project that will cover the issues of energy efficiency, renovation work, inclusive architectural and planning solutions for the house and the surrounding area. No less important in planning is the landscaping of the territory and accessibility. Today, the issue of landscaping, green construction and the "15-minute city" concept is widely considered. The "15-minute city" concept, according the existing planning of residential neighborhoods and areas, can be easily implemented. During the Soviet Union, residential neighborhoods were planned with developed social infrastructure, such as a school, kindergarten, medical facility and areas for sports and recreation. Therefore, the modernization of residential buildings together with the surrounding area will be able to cover the tasks of sustainable development in decarbonization through close accessibility on foot, or by bicycle, to daily necessary facilities. Residential buildings in Ukraine have mostly already reached the end of their operational life or will do so in the near future. Therefore, the issue of the appropriate condition of the building is no less important than achieving sustainable development goals in terms of sustainable urban planning. Unfortunately, comprehensive modernization in Ukraine, and in many other countries, is not considered at the legislative level. Sustainable modernization that will be able, thanks to architectural and engineering solutions, to ensure the implementation of sustainable development tasks and achieve sustainable development goals, which are covered by architecture, construction and urban planning. These are not only attractive buildings and preventing the degradation of old residential areas, but also the economic growth of cities and the country as a whole. Projects of sustainable modernization of panel housing projects of the 70-90s, which still have an unfinished service life, are most appropriate to consider. But without appropriate encouragement from the government, unfortunately, such projects cannot be implemented. The interest of the construction industry in such projects should be no less than the building of new houses. Therefore, the economic benefit for the developers and the development companies should be no less than when building a new house.

Panel residential buildings were built in the same way and have a relatively similar architectural planing solutions. Therefore, an architectural and engineering project can be used for a certain group of houses and modified for another similar development. And this applies not only to the cities of Ukraine, but can also be used in other post-Soviet countries, including some countries of the European Union.

Unfortunately, today there are no financial mechanisms for the implementation of projects that would cover the complete renovation of the building to modern requirements and needs, as well as ensuring the solution of all sustainable development tasks in terms of sustainable urban development and related goals. There is global experience in the renovation of residential buildings. The example of Israel, Singapore and the USA highlights practical promising mechanisms for encouraging the construction sector, co-owners and management companies, such as the

condominiums. Depending on the country, the state has introduced various mechanisms for encouraging developers to modernization.

The main principles are to create economically advantageous conditions for modernization compared to new construction, where not only the developer (investor, developer) but also the co-owners (residents) and the State are in a favorable position. Among such mechanisms are the transfer of modernized housing into partial ownership of the developer; transfer of land into ownership; maintenance of residential development. The construction industry is responsible for the issue of resettlement, provision of temporary or permanent housing at its own expense, or other mechanisms for ensuring the implementation of the project. At the same time, co-owners receive housing that meets modern requirements and needs; the construction industry receives income from the sale of completed residential or commercial space; the State - improvement of the surround area and attractive and nice city. In general, this is an increase in the price of square meters, which has a positive effect on the economic condition of the city and the state as a whole; development and improvement of cities; income from additional square meters; improvement of neighborhoods and prevention of its degradation; improving conditions for residents; achieving the goals of sustainable urban development.

A comprehensive approach should be based on the basic principles depicted in Figure 1.

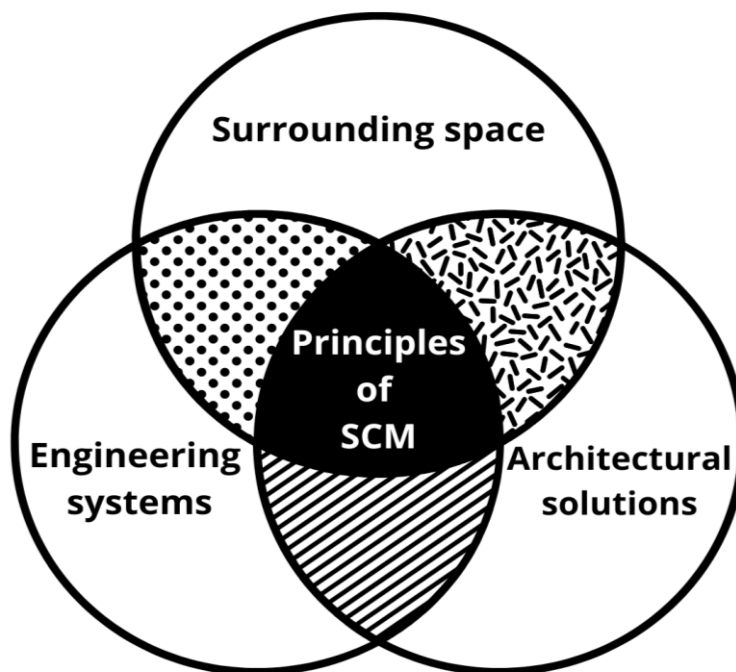


Fig. 1. Principles of sustainable comprehensive modernization of residential buildings (Principles of SCM)

This is a simultaneous comprehensive approach and the creation of a project that ensures the modernization of the engineering structures of the building, the architectural and planning solution of the house and the surround area to improve the quality of living conditions and operational characteristics of the house and the environment.

With a comprehensive approach, using the existing housing stock base: houses built in blocks with wide open surrounding space, it is possible to renovate existing panel housing to a competitive regarding new construction. This does not require the use of new plots and densification of residential space. This approach allows solving a range of tasks of sustainable urban development, which is schematically depicted in Figure 2.

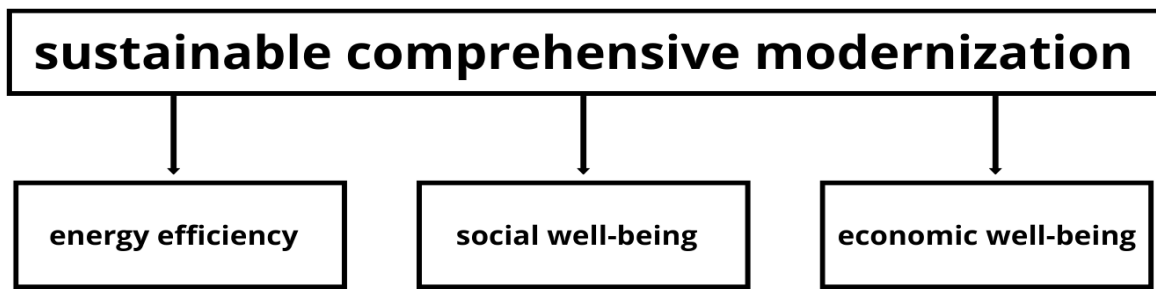


Fig 2. Advantages of the Sustainable comprehensive modernization of the housing stock

This approach prevails in the current situation:

- new, modern, comfortable buildings;
- attractive surrounding area.

It's prevents the degradation of old residential areas; extends the operational life of buildings and creates competition for the new construction.

Comprehensive approach to modernization – modernization of engineering structures, modern architectural and planning solutions without violating the integrity of the building and spatial solutions for the surround area. These allow to obtain a modern residential neighborhoods that ensures environmental friendliness, accessibility, energy efficiency and inclusiveness. As a result – a socio-economically attractive residential space; a renewed attractive city, improving the social and economic well-being of residents.

Conclusions. Sustainable comprehensive modernization can solve a range of important tasks of sustainable urban development and contribute to the achievement of other Goals. An important aspect today is the search for ways to overcome the financial burden on households and ways to create conditions for stakeholders.

Further research and initiatives in this direction are needed. Detailed attention should be paid to a sustainable integrated approach to the modernization of residential development. The implementation of such projects is of great importance for achieving the Sustainable Development Goals and economic growth of countries. It is the appropriate decisions in this direction that will contribute to the possibility and implementation of such important projects.

The project must be competitive with new construction and interesting from a commercial point of view of the developer. Therefore, it is necessary to use all available tools and create new ones to achieve the goal.

Studies confirm a partial approach. But the scientific community supports the need and importance of modernization and notes the positive impact.

Unfortunately, there are almost no comprehensive approaches and projects. We are only at the beginning of such movements.

At the global level, there are not enough existing large-scale studies. At the same time, scientists from different countries highlight the need and importance of modernization, but also note obstacles.

Ukraine, which has suffered damage to buildings as a result of aggression, should be more interested than others not in repair them to their original condition, but in full, comprehensive modernization.

Sustainable modernization of residential buildings, namely the renovation of panel housing stock, according to solution of necessary tasks, will help achieve sustainable development goals and improve the economic well-being of cities and the country.

References

- [1] General Assemble. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (No.70/1). UNFPA. [Online]. Available: https://www.unfpa.org/sites/default/files/resource-pdf/Resolution_A_RES_70_1_EN.pdf Accessed on: February 28, 2025.
- [2] Energy Efficiency Fund. [Online]. Available: <https://eefund.org.ua/en/home/> Accessed on: February 28, 2025.
- [3] Ministry of Finance of the Republic of Lithuania (2018, March 29). Green Bonds for Modernisation of Multi-Apartment Buildings. Government of the Republic of Lithuania. [Online]. Available: <https://finmin.lrv.lt/en/news/green-bonds-for-modernisation-of-multi-apartment-buildings> Accessed on: February 28, 2025.
- [4] What can be financed. Modernisation fund. [Online]. Available: <https://modernisationfund.eu/investments/> Accessed on: February 28, 2025.
- [5] S.I. Derkach, "Analysis of the Current situation of energy modernization of multi-apartment residential buildings as achievement of sustainable development goals", *New Technologies in Construction*, no. 44, pp. 14-20, 2024. <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2024.44.3>
- [6] A. Groh, H. Kuhlwein, S. Bienert, "Does Retrofitting Pay Off? An Analysis of German Multifamily Building Data", *Journal of Sustainable Real Estate*, vol. 12, no. 1, pp. 95-112, 2022. <https://doi.org/10.1080/19498276.2022.2135188>.
- [7] S. D'Oca, A. Ferrante, C. Ferrer, R. Perneti, A. Gralka, R. Sebastian, P. Op't Veld, "Technical, Financial, and Social Barriers and Challenges in Deep Building Renovation: Integration of Lessons Learned from the H2020 Cluster Projects", *Buildings*, vol. 8, no. 12, p. 174, 2018. <https://doi.org/10.3390/buildings8120174>.
- [8] D. Streimikiene, T. Balezentis, "Willingness to Pay for Renovation of Multi-Flat Buildings and to Share the Costs of Renovation", *Energies*, vol. 13, no. 11, 2721, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13112721>.
- [9] Comprehensive Modernization Consultation White Paper (2022). NEW YORK CITY HOUSING AUTHORITY. The Official Website of the City of New York. [Online]. Available: https://www.nyc.gov/assets/nycha/downloads/pdf/comp-mod/NYCHA_Comp_Mod_Consultation_White_Paper.pdf. Accessed on: March 7, 2025.
- [10] N. Aernouts, E. Marranghi, M. Ryckewaert, (Eds.), "The Regeneration of Large-Scale Social Housing Estates. Spatial, Territorial, Institutional and Planning Dimensions", *Soholab*, Brussels, Belgium, 2020. [Online]. Available: https://jpi-urbaneurope.eu/wp-content/uploads/2017/06/soholab_report1.pdf . Accessed on: March 7, 2025.
- [11] W. Fei, A. Opoku, K. Agyekum, J.A. Oppon, V. Ahmed, C. Chen, K.L. Lok, "The Critical Role of the Construction Industry in Achieving the Sustainable Development Goals (SDGs): Delivering Projects for the Common Good", *Sustainability*, vol. 13, no. 16, 9112, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13169112>.
- [12] S.I. Derkach, "The Impact of Sustainable Development on new concept of modernisation of residential buildings", *Modern Construction and architecture*, no. 7, pp. 19-28, 2024. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-7-19-28>.
- [13] P. Fonteyn, S. Daniels, R. Malina, S. Lizin, "In plain sight: Green views from the residence and urbanites' neighborhood satisfaction", *Landscape and Urban Planning*, vol. 245, 105021, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105021>.
- [14] A. Phillips, D. Plastara, A.Z. Khan, F. Canters, "Integrating public perceptions of proximity and quality in the modelling of urban green space access", *Landscape and Urban Planning*, vol. 24, 104875, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104875>.
- [15] Q. Hoai Le, D. Kang, Y. Ahn. "Determinants of psycho-comfort in urban outdoor spaces: A Narrative review using latent dirichlet allocation (LDA) algorithm", *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, vol. 16, no. 1, pp. 3-22, 2025. <https://doi.org/10.22712/susb.20250002>.

РОЛЬ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ У ДОСЯГНЕННІ ЦІЛЕЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ: ТЕОРЕТИЧНІ РІШЕННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ

Деркач С.І., аспірант,

derkach.sergii@gmail.com, ORCID: 0009-0006-4380-4924

Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури
вул. Вознесеньський узвіз, 20, Київ, 04053, Україна

Анотація. Модернізація житлової забудови є значним внеском у досягненні цілей сталого розвитку та вирішенні його задач. Житловий фонд України переважним чином складається з панельної житлової забудови проектів і будівництва років Радянського Союзу. За статистичними даними стара житлова забудова загалом становить більше 85% всього житлового фонду України. Такі будинки не відповідають сучасним вимогам і стандартам. Подібна ситуація з соціальним житловим фондом і в інших країнах, особливо в країнах зі спадщиною радянської панельної забудови. Відновлення старого житлового фонду та приведення його до сучасних потреб, вимог та стандартів значним чином вплине на зменшення споживання первинної енергії та зменшення викидів вуглецю, вирішення задач сталого розвитку в частині інклюзивності та створення привабливих житлових умов відповідно до сучасних стандартів.

Розглядається проблематика модернізації панельної житлової забудови – спадщини Радянських часів. Виявляються та аналізуються прогалини в даному питанні. Описово пояснювальним методом наводяться аргументи необхідності та важливості сталої комплексної модернізації. Приводяться теоретичні рішення та можливості для реалізації проектів комплексної модернізації. Зазначається важливість і переваги такого принципу. При цьому відмічається позитивний вклад у розбудову міст. Але зазначаються перешкоди і необхідність їх подолання.

Темі комплексного підходу до модернізації житлового фонду необхідно приділити більше уваги. Адже часткові рішення не вирішують всіх проблем будинку і навколишнього середовища. Також не дозволяють у повному обсязі досягти цілей сталого розвитку, які може забезпечити комплексна модернізація житлової забудови.

Комплексний підхід до модернізації житлової забудови дозволяє створити конкурентні умови новому будівництву, перешкоджає деградації старих житлових кварталів. Як результат – економічний і соціальний добробут мешканців; економічне зростання міста. Вирішення низки завдань сталого міського розвитку та досягнення інших цілей Сталого розвитку.

Ключові слова: стійка комплексна модернізація, житлові мікрорайони, житловий фонд, масова панельна житлова забудова, сталий розвиток, сталий розвиток міст, реновація.

Стаття надійшла до редакції 25.03.2025

[This work](#) © 2025 by [Derkach S.I.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

**СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПРОЄКТНИХ КОНФІГУРАЦІЙ
ОСЬОВОЇ ЛІНІЇ ОДЕСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ**

¹**Ковров А.В.**, к.т.н., професор,
rektor@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6037-6080

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

²**Гайко Г.І.**, д.т.н., професор,
h.haiko@kpi.ua, ORCID: 0000-0002-4263-5958

²**Савченко І.О.**, к.т.н.,
savil.ua@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0921-5425

²*Національний технічний університет України*
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Берестейський проспект, 37, м. Київ, 03056, Україна

³**Назаренко І.І.**, д.т.н., професор,
ii_nazar@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1888-3687

³*Київський національний університет будівництва та архітектури*
проспект Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

⁴**Голландер Дж.**, д-р арх., професор,
justin.hollander@tufts.edu, ORCID: 0000-0001-5148-7902

⁴*Університет Тафтса*
Бостонська алея, 506, м. Медфорд, шт. Массачусетс, 02155, США

Анотація. Регулювання розвитку урбаністичного простору з метою підвищення комфорту, екологічних стандартів і безпеки життя в постійно зростаючих мегаполісах є однією з найбільш актуальних, але недостатньо вивчених і складних глобальних проблем. Концепція сталого розвитку міського середовища приділяє значну увагу здатності підземного простору взяти на себе функції найбільш критичних і вразливих наземних об'єктів і комунікацій, забезпечуючи мінімізацію транспортних, безпекових і екологічних проблем, що значною мірою (для умов міста Одеси) може бути досягнуте будівництвом осьової (північ – південь) лінії Одеського метрополітену. Повоєнне відновлення Одеси сприятиме новим можливостям для реалізації великих інфраструктурних проєктів на засадах міжнародного партнерства, зокрема – будівництва метрополітену.

Метою досліджень є системна порівняльна оцінка альтернативних проєктних конфігурацій осьової лінії Одеського метрополітену (її південної частини).

Основним методом дослідження обрано метод модифікованого морфологічного аналізу, який є ефективним інструментом системної методології для умов багатокритеріальних впливів і високої невизначеності. Розроблена системна методологія та інструментарій прийняття планувальних рішень у сфері підземної урбаністики, а також досвід застосування планувальних методик, що використовують наукове передбачення майбутнього розвитку міст були використані для побудови морфологічної моделі ділянок Одеського метрополітену.

Розроблена морфологічна модель дозволила оцінити вплив 10 структурно-функціональних факторів і обробити понад 349 000 конфігурацій значень для отримання кількісних оцінок і порівняння альтернативного розташування кінцевих станцій Одеського метрополітену. Розглядалися впливи: на вирішення транспортної проблеми, сприяння містобудівельному розвитку, сприяння туристично-рекреаційному розвитку, мінімізацію екологічних проблем, цивільний захист населення. Це дає міському самоврядуванню, державним органам влади, зацікавленим громадським організаціям та інвесторам ефективний інструмент для прийняття планувальних рішень, виходячи із системних позицій.

Ключові слова: підземне будівництво, транспортна інфраструктура, метрополітен, системний аналіз, морфологічна модель.

Вступ. «Одеса з повним правом може претендувати на одне з чільних місць серед великих міст світу» – так починає свою «Історію Одеси» дослідниця Гарвардського університету Патриція Герлігі [1] (з чим повністю погоджуються автори даної статті). Здається, що вже «батьки-засновники» міста (засноване в 1794 р.), каталонець за походженням адмірал Хосе де Рібас, нідерландський інженер Франц де Воллан, французькі аристократи Арман Емманюель дю Плессі (п'ятий герцог де Рішельє) та граф Луї Олександр Андро де Ланжерон (учасник Війни за незалежність США), які перебували на службі Російській імперії, заклали тренд європейських устремлінь Одеси («південне вікно в Європу») та непритаманну колишній імперії ідею «відкритого міста», сприятливого для формування мультикультурного розвитку [2].

План забудови Одеси розробив інженер-полковник Франц де Воллан, який сформувався як інженер-будівельник у голландських поселеннях Північної Америки, увібравши кращий досвід тогочасного містобудування (закладена ним планувальна структура центрального ядра міста збереглася до наших днів). Письменник Марк Твен, який відвідав Одесу в 1867 р., зазначав: «Я... відчував себе зовсім як удома. На вигляд Одеса точнісінько американське місто: красиві широкі вулиці, до того ж прямі; невисокі будинки (в два-три поверхи) – просторі, охайні, без жодних химерних прикрас; вздовж тротуарів наша біла акація; ділова метушня на вулицях та в лавках; квапливі пішоходи; будинки й усе довкола новеньке як з голочки, що так звично нашому оку; і навіть густа хмара пилу огорнула нас ніби привіт з милої нашому серцю батьківщини... Куди не подивися, праворуч, ліворуч, скрізь перед нами Америка!» («Простаки за кордоном, або шлях нових паломників») [3]. Шедеври визнаних європейських архітекторів XIX – початку XX ст. у стилях класицизму, ампіру та модерну і сьогодні щедро прикрашають вулиці історичного середмістя Одеси (об'єкт Світової спадщини ЮНЕСКО) [4].

На початку XX ст. Одеса була найбільшим містом України з населенням понад 400 тис. мешканців і вийшла на четверте місце в Російській імперії за розмірами та економічним потенціалом. Цей ринок і порт забезпечував (з різною інтенсивністю) українським зерном країни Європи та Західної Азії протягом всього XIX ст. [5]. Актуальна проблема «зернового коридору» для продовольчої безпеки Глобального Півдня, як бачимо, має поважну історію.

Сьогодні Одеса є містом воєнного часу, зруйновано або ушкоджено десятки пам'яток архітектури середмістя (яке входить до списку Світової спадщини ЮНЕСКО). Здається тепер не кращий час для прогнозування майбутнього розвитку міста (особливо великих інфраструктурних проєктів), але, на думку авторів статті, саме зараз слід планувати нове майбутнє української Одеси, зокрема пам'ятаючи написане Марком Твеном: «Одеса, можливо, ще зрівняється з найвеличнішими містами Старого Світу».

На 2022 р. населення Одеси перебільшувало 1 млн. мешканців, площа складала понад 162 км², а протяжність з півночі на південь – близько 35 км. У місті знаходиться найбільший морський порт України, розвинуті нафтопереробна, металообробна, машинобудівна, хімічна, легка й харчова промисловість. Довоєнна Одеса інтенсивно розвивалася як багатофункціональний економічний, курортно-рекреаційний і туристичний центр.

Серед найбільших проблем сталого розвитку Одеси протягом останніх десятиріч слід зазначити функціонування міського транспорту, яка отримала особливу гостроту в 2015-2018 роках (до епідемії COVID-19), коли щорічна кількість туристів та відпочиваючих на пляжах Одеси складала понад 3 млн. осіб [6, 7]. Одеса – портове місто. Його специфікою є те, що в центрі міста знаходиться вантажний порт та залізничний вокзал, що формує значне зосередження транспорту. Забудова міста в основному відповідає прямокутній схемі транспорту, також від центральної частини в радіальних напрямках проходять магістралі загальноміського значення, які виходять на мережу зовнішніх доріг. Недоліком прямокутної схеми є велика кількість завантажених перехресть, що ускладнюють організацію руху і збільшують транспортні витрати, формують великі переїзди автомобілів. Слід зазначити,

що планування й розвиток основної частини міста відбувались у період використання ще гужового транспорту, тому існуюча магістрально-вулична мережа не може без проблем забезпечувати сучасну інтенсивність руху автомобільного транспорту (корки й транспортні просторі є типовим явищем). Передбачене в Генеральному плані м. Одеси [8] будівництво та реконструкція автомобільної транспортної мережі здатне дещо покращити існуючу проблемну ситуацію, проте збільшення пропускнує спроможності міських вулиць у більшості випадків вже вичерпані, а повоєнні темпи зростання рівня автомобілізації та автотуризму будуть нівелювати обмежені позитивні ефекти намічених заходів.

Виходячи з цього, слід (на думку авторів) на новому науково-методологічному рівні повернутися до аналізу планів будівництва Одеського метрополітену, який здатен найбільш ефективним чином вирішити комплекс проблем розвитку Одеси: територіальну, транспортну, рекреаційну, екологічну, а з урахуванням воєнних і терористичних загроз – значною мірою і безпекову. Імовірна міжнародна підтримка великих інфраструктурних проєктів на етапі повоєнного відновлення Одеси відкриває виняткові можливості для втілення давньої мрії одеситів – будівництва Одеського метрополітену.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одним із важливих напрямків покращення транспортної ситуації в Одесі є розвиток ефективного громадського транспорту як альтернативи індивідуальним автомобільним перевезенням. Про значні ефекти й можливості цього напрямку свідчать численні міжнародні дослідження, приміром [9]. Вони свідчать, що площа поверхні, необхідна для функціонування індивідуального (автомобільного) транспорту потребує в 30-90 разів більше простору, ніж громадський транспорт (при тих самих обсягах перевезень пасажирів), при цьому громадський транспорт призводить до скорочення часу подорожі, нижчого споживання енергії та зменшення шумового забруднення [9]. Транспортні моделі міст свідчать на користь розвитку системи громадського транспорту [10, 11]. Так дослідження [11] вказує на систему метро Нью-Йорка як на взірцевий транспортний архетип. Його 232 милі колій спроектовані з резервуванням на перспективу (три-чотири колії на кожен ліній метро) та з високою транспортною щільністю: майже 150 поїздів проходять через Нижній Мангеттен щогодини. Метрополітен бачиться як найбільш ефективний спосіб вирішення міських транспортних проблем, який одночасно позитивно впливає на кліматичну нейтральність, зменшує екологічні та безпекові ризики.

Вперше ідея будівництва Одеського метрополітену сформувалася в 1960-х роках, у 1979-х, коли чисельність населення Одеси досягла 1 млн. осіб, було розроблено концепт будівництва метрополітену як однієї протяжної «осьової» лінії з півночі на південь. У середині 1980-х проєктний інститут «Ленметрогипротранс» (тепер м. Санкт-Петербург) розпочав проєктні роботи. Тунелі планували прокласти нижче покладів вапняків, які були пронизані системами катакомб, що утворилися від довготривалого видобування будівельного каменю. Проте генеральний секретар ЦК КПРС Костянтин Черненко викреслив українські міста Одесу та Донецьк з плану будівництва метрополітенів, замінивши їх російськими містами. Наприкінці 1990-х одеські інженери почали розробляти нові плани та конструктивні рішення Одеського метрополітену, які, на жаль, не були підтримані відповідними державними програмами України.

У проєкт Генерального плану м. Одеси закладені дві лінії метрополітену загальною протяжністю 37 км (рис. 1) [8]. Як альтернативний варіант розглядається легкий метрополітен. На розрахунковий етап до 2031 р. була запланована для будівництва ділянка першої лінії («північ-південь») від житлового масиву на півночі Пересипського району (колишня назва імені Котовського) до залізничного вокзалу. Її протяжність близько 18 км. Ця ділянка чітко визначена і затверджена в Генеральному плані міста. Усі інші траси (лінії) метрополітену є перспективними й можуть уточнюватися. Передбачалося, що перша лінія пройде до південно-західного житлового масиву в напрямку Люстдорфської дороги (рис. 1, кінцева станція 1), а загальна протяжність лінії складе 26,2 км. Друга лінія протяжністю 10,2 км може пройти від Фонтанської дороги (рис. 1, кінцева станція 2) до залізничного вокзалу (місця переходу з однієї на іншу лінію) і далі до західної промислової зони міста.



Рис. 1. Альтернативні шляхи і кінцеві станції Одеського метрополітену: ділянка 1 – кінцева станція «Проспект академіка Глушка» першої лінії; ділянка 2 – кінцева станція «Фонтанна» другої лінії

Основна проблема проекту Одеського метрополітену – відсутність інвестицій, рішення якої може спиратися на партнерство приватного і державного секторів [12]. Історія Одеси має успішні приклади подібних інфраструктурних проектів – будівництво міської кінної залізниці (1880 р.) та електричного трамваю (1910 р.), які здійснили бельгійські акційні товариства. На повоєнному етапі найреалістичнішим є проєкт метро з однією лінією «північ-південь». При цьому «північна» ділянка першої лінії (від півночі Пересипського району до залізничного вокзалу) визначена в Генеральному плані однозначно.

Південна частина поки є перспективною й може пролягати або в напрямку Люстдорфської дороги, або другої лінії в напрямку проспекту Шевченка і Фонтанської дороги.

Метою даних досліджень є системна порівняльна оцінка переваг та ризиків зазначених альтернативних маршрутів осової лінії (їх південних кінцевих станцій) для забезпечення інвесторів, міської адміністрації, громадських організацій системним інструментарієм прийняття рішень щодо найбільш перспективного розвитку Одеського метрополітену і міста в цілому.

Матеріали та методика дослідження. Метрополітен завжди формує основу, «кістяк» пасажирських перевезень міста, забезпечує новий розвиток землекористування, будівельного освоєння територій, вартості нерухомості, значною мірою впливає на екологічність та кліматичну нейтральність міст, може слугувати надійним укриттям цивільного населення при воєнних загрозах [12]. Важливо також враховувати впливи на соціальну інтеграцію людини у великому місті, соціокультурні та екзистенціальні виклики для *Nomo urbanus* [13]. Робота [14] пов'язує розвиток транспорту з різнобічними аспектами життя міських громад і, зокрема, зазначає: «відсутність комплексного планування транспортних систем, без належного врахування соціальних, економічних і культурних елементів міста, може призвести до фізичних розривів у тканині громад і посилити соціальну ізоляцію». Перспективними бачаться планувальні ідеї, які спираються не тільки на існуючий стан речей, а й враховують наукові передбачення розвитку міста, а часом цілеспрямовано сприяють реалізації цих передбачень [14, 15]. Усе це потребує при аналізі варіантів можливих маршрутів (трас) метрополітену використовувати системний підхід, спрямований на вирішення не тільки існуючої транспортної проблеми, яка стає первісною причиною створення лінії швидкісного підземного транспорту, але й інших аспектів розвитку міста з урахуванням їх складних взаємозалежностей.

В Навчально-науковому Інституті прикладного системного аналізу КПІ ім. Ігоря Сікорського була розроблена формалізація ряду методів якісного аналізу, зокрема морфологічного аналізу, що є частиною основи комплексу інструментів побудови сценарних альтернатив на основі інтерактивної людино-комп'ютерної процедури (інформаційної платформи сценарного аналізу) [16, 17]. Дана методика та інструментарій були адаптовані для планування міських підземних об'єктів, апробовані при виборі ділянок для підземних автостоянок, автомобільних тунелів, підводних об'єктів [13, 18, 19].

Для поставленої мети застосовувався модифікований метод морфологічного аналізу як багатоцільовий потужний інструмент системного дослідження та підтримки прийняття рішень стосовно об'єктів, яким притаманна невизначеність [20]. Модифікація методу [17, 21] полягає в кількісному оцінюванні альтернатив параметрів і зв'язків між ними, що дає змогу обґрунтовано працювати з великою кількістю конфігурацій об'єкта, які неможливо обробити вручну.

У роботі [22] досліджувався пріоритетний рейтинг альтернативних ліній Одеського метрополітену з використанням одноетапної процедури модифікованого методу морфологічного аналізу. У представленому новому дослідженні використовувалась повноцінна двоетапна процедура методу [17], в якій на першому етапі усебічно досліджувалась ситуація в районі потенційних кінцевих станцій метрополітену, а на другому етапі оцінювався очікуваний вплив на різні критичні фактори функціонування міста.

Для імплементації даної процедури застосовувались програмні засоби на основі SAS Studio з авторськими модулями Microsoft Visual Studio, що відповідають основним етапам МММА. У випадку застосованої двоетапної процедури взаємодія між модулями показана на рис. 2.

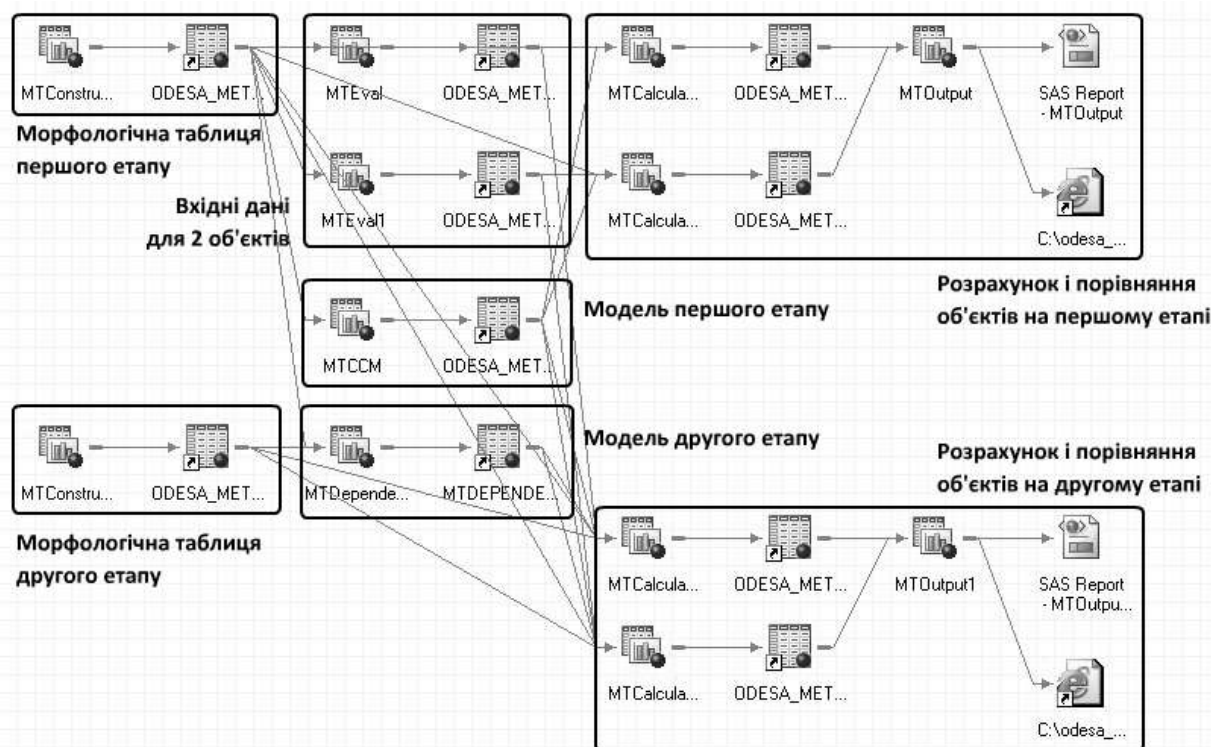


Рис. 2. Взаємодія модулів програмного забезпечення для розв'язання задачі

Об'єктом першого етапу дослідження було обрано зону в радіусі 1 км від потенційної кінцевої станції метрополітену – орієнтовну територію її впливу. Через різноманітність і невизначеність характеристик цієї ділянки доцільно використати метод МММА. Було визначено 10 ключових параметрів, що найсуттєвіше впливають на оцінку впливу станції метрополітену. Всі вони, разом з описом альтернатив, представлені в морфологічній таблиці (табл. 1).

Таблиця 1 – Морфологічна таблиця структурно-функціональних факторів території впливу кінцевої станції метрополітену

Параметр	Альтернативи параметра
1. Тип урбаністичного середовища	1.1. «Діловий центр» (офісні та адміністративні споруди, ділові й культурні центри)
	1.2. «Старе місто» (історичні та архітектурні пам'ятки)
	1.3. «Спальний район» (типова житлова забудова)
	1.4. «Рекреаційна зона» (курортні об'єкти, парки, пляжі)
	1.5. «Торгівельна зона» (мегамаркети, оптові бази, великі ринки)
	1.6. «Промислова зона» (виробничі об'єкти, транспортні споруди, склади)
2. Щільність населення	2.1. До 150 осіб/га
	2.2. 150-250 осіб/га
	2.3. 250-450 осіб/га
	2.4. 450-540 осіб/га
	2.5. Позанормативна (більше 540 осіб/га)
3. Щільність магістральної мережі	3.1. 0,5-1 км/км ²
	3.2. 1-1,5 км/км ²
	3.3. 1,5-2 км/км ²
	3.4. 2-2,5 км/км ²
4. Мобільність туристів (відпочиваючих)	4.1. Низька (до 1 тис. осіб на добу)
	4.2. Середня (1-10 тис. осіб на добу)
	4.3. Висока (10-20 тис. на добу)
	4.4. Вельми висока (понад 20 тис. на добу)
5. Маятниковий рух працівників (на роботу – з роботи)	5.1. Низький
	5.2. Середній
	5.3. Високий
6. Доступність громадського транспорту	6.1. Низька
	6.2. Задовільна, крім часів «пік»
	6.3. Задовільна
7. Альтернативні типи громадського транспорту	7.1. Відсутні
	7.2. Суттєво обмежені
	7.3. Достатні
8. Середня швидкість руху автомобільного транспорту	8.1. До 20 км/год
	8.2. 20-30 км/год
	8.3. 30-50 км/год
9. Містобудівельний потенціал території	9.1. Низький
	9.2. Середній
	9.3. Високий
10. Наявність захисних споруд цивільного захисту (підземних об'єктів)	10.1. Значна невідповідність потребам
	10.2. Часткова невідповідність потребам
	10.3. Відповідність потребам

Тип урбаністичного середовища (параметр 1) буде визначати переважну функцію території навколо кінцевої станції. Будь який з них вочевидь покращить своє функціонування з появою станції метрополітену, проте різною мірою і з різним впливом на розвиток навколишньої території.

Щоденна кількість пасажирів, які користуватимуться станцією метро, значною мірою залежить від щільності населення в цій зоні (параметр 2), адже вона визначає інтенсивність переміщень мешканців у повсякденних справах.

Стан транспортної інфраструктури відображає щільність магістральної мережі (параметр 3). Чим вона менша, тим менше альтернативних маршрутів, більше заторів і нижча швидкість руху, що підсилює потребу в будівництві метро. Середня щільність магістральної мережі на забудованій частині міста на сьогодні складає 1,29 км/км².

Мобільність туристів і відпочиваючих (параметр 4) має як прямий, так і непрямий вплив. Прямий – це додаткові пасажирів, що користуватимуться метро для поїздок у рекреаційні зони. Непрямий – зростання навантаження на транспорт через розвиток туризму й рекреаційного будівництва. Не прямий вплив не завжди чітко простежується в планувальних рішеннях. До повномасштабного російського вторгнення Одеса приймала до 3 млн туристів на рік, що викликало локальні транспортні колапси. Без вирішення цих проблем повоєнне зростання туризму буде обмеженим. Це формує систему взаємозалежностей: мобільність туристів – розвиток рекреацій – метро як ключ до транспортного розвантаження.

«Маятниковий рух» працівників (параметр 5) суттєво впливає на транспортну систему, особливо в години пік, спричиняючи затори та затримки. Він тісно пов'язаний із щільністю населення й зайнятістю: до повномасштабного російського вторгнення 34,6% працювали у виробничій сфері, 65,4% — у невиробничій. Основний потік рухається з півдня на північ і навпаки, що робить осьову лінію метро стратегічно важливою. Всі інші напрямки охоплюють лише до 20% пасажиропотоку.

Доступність наявного громадського транспорту (параметр 6) і його альтернативні типи (параметр 7) визначають зручність транспортної логістики для мешканців та свідчать про рівень проблем із пасажирськими перевезеннями у певному районі. Параметр 8, а саме середня швидкість руху автотранспорту, є близьким за змістом до параметрів 6 і 7, але має ще й екологічне значення: чим нижча швидкість і більше заторів, тим вищий рівень шкідливих викидів та екологічних ризиків. Цей параметр також демонструє переваги швидкості руху метрополітемом як екологічно чистим видом транспорту.

Параметр 9 (містобудівельний потенціал території) відіграє ключову роль у визначенні можливостей розвитку району після відкриття станції метро. Він пов'язаний як з наявністю вільних ділянок, природних умов (наприклад, рельєфу), так і з можливістю оновлення застарілої забудови. Водночас важливими є інвестиційна привабливість території, їх пріоритетність для будівельного освоєння з врахуванням очікуваного зростання ринкової вартості нерухомості. Цей параметр тісно пов'язаний із загальною стратегією розвитку району та Одеси в цілому, адже уявлення про майбутнє міста безпосередньо впливає на оцінку цього параметру.

Параметр 9 (фактор захисних споруд цивільного захисту) набув актуальності лише останнім часом, проте буде її зберігати. Донедавна повномасштабна війна в Європі здавалася малоімовірною, але тепер її реальність в Україні змінила підходи до безпеки для всіх сусідів Росії [23]. Підземні укриття, зокрема станції метро, стали важливою складовою захисту населення. Наприклад, у Києві 46 підземних станцій цілодобово функціонують як укриття, де під час тривоги переховуються від ракетних та дронівих атак до 60 тисяч мешканців.

На другому етапі досліджень було визначено п'ять основних типів впливу на функціонування міста від побудови метрополітену: вирішення транспортних проблем; сприяння містобудівельному розвитку; сприяння туристично-рекреаційному розвитку; мінімізація екологічних проблем; цивільний захист населення.

Морфологічна таблиця другого етапу досліджень наведена в табл. 2.

Таблиця 2 – Морфологічна таблиця факторів впливу кінцевої станції метрополітену на функціонування міста

Параметр	Альтернативи параметра
А. Вирішення транспортної проблеми	А.1. Незначний вплив
	А.2. Помірний вплив
	А.3. Суттєвий вплив
	А.4. Переважаючий вплив
В. Сприяння містобудівельному розвитку	В.1. Незначний вплив
	В.2. Помірний вплив
	В.3. Суттєвий вплив
	В.4. Переважаючий вплив
С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку	С.1. Незначний вплив
	С.2. Помірний вплив
	С.3. Суттєвий вплив
	С.4. Переважаючий вплив
D. Мінімізація екологічних проблем	D.1. Незначний вплив
	D.2. Помірний вплив
	D.3. Суттєвий вплив
Е. Цивільний захист населення	Е.1. Помірний вплив
	Е.2. Суттєвий вплив
	Е.3. Переважаючий вплив

Для забезпечення більш об'єктивної оцінки категорії впливу різних факторів були описані у вербальній формі.

А. Вирішення транспортної проблеми (мобільності) для населення та туристів (відпочиваючих) на відповідній ділянці з радіусом 1 км від станції:

А.1. Незначний вплив – станція не суттєво змінює конфігурацію транспортних потоків території; наявні транспортні проблеми вирішуються недостатньо.

А.2. Помірний вплив – станція частково розвантажує пасажиропотоки на відповідній ділянці, проте не перетворюється на суттєвий фактор в транспортній мережі; наявні транспортні проблеми дещо зменшуються.

А.3. Суттєвий вплив – станція суттєво розвантажує пасажиропотоки на ділянці і стає важливим вузлом транспортної мережі; наявні транспортні проблеми істотно зменшуються.

А.4. Переважаючий вплив – станція переорієнтовує на себе основні пасажиропотоки на ділянці, значно розвантажуючи транспортну мережу; транспортні проблеми мешканців та туристів успішно вирішуються.

В. Сприяння містобудівельному розвитку відповідної території:

В.1. Незначний вплив – станція майже не створює нових можливостей для розвитку території. Це може бути зумовлено як щільною існуючою забудовою, так і низькою інвестиційною привабливістю ділянки.

В.2. Помірний вплив – станція частково підвищує привабливість території, сприяє зростанню вартості нерухомості, проте не призводить до суттєвих якісних змін з точки зору розвитку даної території.

В.3. Суттєвий вплив – станція відкриває нові перспективи розвитку даної території міста, значно збільшуючи вартість нерухомості та привабливість ділянки для інвестування.

В.4. Переважаючий вплив – станція виступає вирішальним чинником розвитку території, стимулюючи масштабне будівництво інфраструктури, а також висококласних об'єктів рекреаційного, готельного, ділового й житлового призначення.

С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку даної території:

С.1. Незначний вплив – станція та прилегла територія не мають вираженої туристичної привабливості й переважно обслуговуватимуть потреби місцевих мешканців.

C.2. Помірний вплив – станція частково використовуватиметься при переміщеннях туристів, але не відіграє значної ролі у туристично-рекреаційному розвитку території.

C.3. Суттєвий вплив – станція відіграватиме важливу роль у забезпеченні мобільності туристів і відпочивальників, значно підвищуючи туристично-рекреаційну привабливість території.

C.4. Переважаючий вплив – станція створює нові суттєві можливості для розвитку туристично-рекреаційного потенціалу території.

D. Захист природного середовища (мінімізація екологічних проблем):

D.1. Незначний вплив – станція а також пов'язані з її будівництвом зміни в транспортній мережі суттєвого впливу на навколишнє екологічне середовище не матимуть.

D.2. Помірний вплив – станція та відповідне зниження навантаження на транспортну мережу частково сприятимуть покращенню екологічної ситуації на відповідній території.

D.3. Суттєвий вплив – станція та спричинене нею розвантаження транспортної мережі суттєво покращать екологічний стан території.

E. Цивільний захист населення (на випадок воєнних чи терористичних атак):

E.1. Помірний вплив – станція має деякий потенціал для використання як укриття цивільного захисту для жителів прилеглих вулиць;

E.2. Суттєвий вплив – станція має високий потенціал для використання як укриття цивільного захисту для мешканців і туристів, які перебувають на відповідній території.

E.3. Переважаючий вплив – станція стане основною спорудою цивільного захисту на відповідній території.

Наступним етапом у побудові моделі за МММА стало визначення взаємозв'язків між параметрами першої морфологічної таблиці, а також зв'язків між параметрами першої та другої таблиць. Ця процедура здійснювалася шляхом експертного опитування. У табл. 3 наведені наявні зв'язки між параметрами 1–10, А–Е з табл. 1–2.

Таблиця 3 – Наявність або відсутність зв'язків між параметрами морфологічних таблиць (позначка «+» означає, що зв'язок між параметрами присутній, порожня клітинка – відсутній)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	A	B	C	D	E
1			+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
2			+		+	+	+	+		+	+	+			+
3	+	+		+	+	+	+	+	+		+	+		+	
4	+		+			+	+	+	+	+	+	+	+		+
5	+	+	+			+	+	+			+			+	
6	+	+	+	+	+		+	+	+		+	+	+		
7		+	+	+	+	+		+	+		+		+		
8	+	+	+	+	+	+	+		+		+			+	
9	+		+	+		+	+	+		+	+	+	+		
10	+	+		+					+				+		+

Результати досліджень. У результаті двоетапної процедури МММА було проаналізовано 349 920 конфігурацій, згенерованих на першому етапі за морфологічною таблицею. Результати цього етапу наведені в таблиці 4. У таблиці відображені початкові значення, отримані експертним шляхом, і обчислені за допомогою процедури МММА значення, що враховують взаємозв'язки між параметрами (табл. 3). Тут і далі за текстом під «Ділянкою 1» розуміється кінцева станція в районі Люстдорфської дороги; під «Ділянкою 2» розуміється кінцева станція метро в районі Фонтанської дороги.

Таблиця 4 – Вхідні і уточнені з урахуванням взаємозв'язків оцінки параметрів морфологічної таблиці структурно-функціональних факторів

Параметр	Альтернативи параметра	Нормовані вхідні дані		Уточнені за МММА дані	
		Ділянка 1	Ділянка 2	Ділянка 1	Ділянка 2
1. Тип урбаністичного середовища	1.1. «Діловий центр»	0,087	0,114	0,129	0,100
	1.2. «Старе місто»	0	0	0,000	0,000
	1.3. «Спальний район»	0,348	0,200	0,518	0,222
	1.4. «Рекреаційна зона»	0	0,457	0,000	0,388
	1.5. «Торгівельна зона»	0,283	0,114	0,315	0,276
	1.6. «Промислова зона»	0,283	0,114	0,038	0,014
2. Щільність населення	2.1. До 150 осіб/га	0,091	0,432	0,020	0,339
	2.2. 150-250 осіб/га	0,295	0,351	0,118	0,367
	2.3. 250-450 осіб/га	0,364	0,108	0,577	0,206
	2.4. 450-540 осіб/га	0,159	0,108	0,219	0,087
	2.5. Більше 540 осіб/га	0,091	0	0,066	0,000
3. Щільність магістральної мережі	3.1. 0,5-1 км/км ²	0,175	0,259	0,018	0,083
	3.2. 1-1,5 км/км ²	0,400	0,593	0,334	0,797
	3.3. 1,5-2 км/км ²	0,325	0,148	0,596	0,120
	3.4. 2-2,5 км/км ²	0,100	0	0,053	0,000
4. Мобільність туристів (відпочиваючих)	4.1. Низька	0,593	0	0,108	0,000
	4.2. Середня	0,259	0,194	0,764	0,693
	4.3. Висока	0,148	0,361	0,128	0,224
	4.4. Вельми висока	0	0,444	0,000	0,083
5. Маятниковий рух працівників	5.1. Низький	0,111	0,552	0,004	0,207
	5.2. Середній	0,444	0,448	0,647	0,793
	5.3. Високий	0,444	0	0,349	0,000
6. Доступність громадського транспорту	6.1. Низька	0,148	0,481	0,020	0,098
	6.2. Задовільна, крім часів «пік»	0,593	0,259	0,950	0,855
	6.3. Задовільна	0,259	0,259	0,030	0,047
7. Альтернативні типи громадського транспорту	7.1. Відсутні	0	0,148	0,000	0,026
	7.2. Суттєво обмежені	0,350	0,593	0,284	0,761
	7.3. Достатні	0,650	0,259	0,716	0,213
8. Середня швидкість руху автомобільного транспорту	8.1. До 20 км/год	0,194	0,361	0,061	0,216
	8.2. 20-30 км/год	0,444	0,444	0,835	0,742
	8.3. 30-50 км/год	0,361	0,194	0,104	0,042
9. Місто-будівельний потенціал території	9.1. Низький	0,696	0,233	0,127	0,090
	9.2. Середній	0,304	0,533	0,873	0,874
	9.3. Високий	0	0,233	0,000	0,036
10. Наявність захисних споруд цивільного захисту	10.1. Значна невідповідність потребам	0,361	0,552	0,182	0,202
	10.2. Часткова невідповідність потребам	0,444	0,448	0,794	0,798
	10.3. Відповідність потребам	0,194	0	0,024	0,000

На другому етапі МММА були обчислені оцінки впливу структурно-функціональних факторів на різні аспекти функціонування Одеси. Результати даних розрахунків наведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Оцінки впливу побудови кінцевої станції метрополітену за одним із двох варіантів

Параметр	Альтернативи параметра	Ділянка 1	Ділянка 2
А. Вирішення транспортної проблеми	А.1. Незначний вплив	0,050	0,076
	А.2. Помірний вплив	0,451	0,481
	А.3. Суттєвий вплив	0,449	0,409
	А.4. Переважаючий вплив	0,050	0,035
В. Сприяння містобудівельному розвитку	В.1. Незначний вплив	0,069	0,042
	В.2. Помірний вплив	0,527	0,371
	В.3. Суттєвий вплив	0,368	0,483
	В.4. Переважаючий вплив	0,035	0,105
С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку	С.1. Незначний вплив	0,243	0,151
	С.2. Помірний вплив	0,484	0,426
	С.3. Суттєвий вплив	0,211	0,305
	С.4. Переважаючий вплив	0,062	0,118
D. Мінімізація екологічних проблем	D.1. Незначний вплив	0,108	0,044
	D.2. Помірний вплив	0,447	0,431
	D.3. Суттєвий вплив	0,445	0,526
Е. Цивільний захист населення	Е.1. Помірний вплив	0,440	0,427
	Е.2. Суттєвий вплив	0,449	0,433
	Е.3. Переважаючий вплив	0,111	0,140

Кожний з факторів впливу розглядатиме окремо.

За параметром «А. Вирішення транспортної проблеми» ділянка 1 переважає в діапазонах «суттєвий» і «переважаючий» вплив (рис. 3). Це пов'язано з вищою щільністю населення в зоні майбутньої кінцевої станції. Тут переважає багатоповерхова забудова, включно з висотками, тоді як на ділянці 2 розташована переважно садибна забудова. Також для ділянки 1 більш значним є «маятниковий рух» працюючих мешканців. Решта параметрів або мають близькі значення, або незначно переважають на користь ділянки 2. Для дослідження ділянки 2 розглядалася територія радіусом 1 км від потенційного місця розташування кінцевої станції, відповідно сюди не потрапили трохи віддалені і щільно населенні житлові висотні комплекси курортного району Аркадія. Проте при реалізації проекту лінії 2 мешканці Аркадії будуть активно користуватися метрополітенем, що за параметром «Вирішення транспортної проблеми» зближить потенціал обох варіантів.

За параметрами «В. Сприяння містобудівельному розвитку» та «С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку» перевагу в діапазонах «суттєвий вплив» і «переважаючий вплив» має ділянка 2 (рис. 4, 5). Хоча Генеральний план Одеси до 2031 року не передбачає значного приросту забудови в цих районах через високу щільність населення, обмеженість вільних територій, природні обмеження (зокрема берегові схили) та транспортні проблеми, напрямок Фонтанської дороги залишається привабливим для інвесторів. Близькість до моря робить цей район перспективним для розвитку туризму, рекреації та об'єктів сфери обслуговування, які вже сьогодні є пріоритетними напрямками інвестиційної діяльності в Одесі.

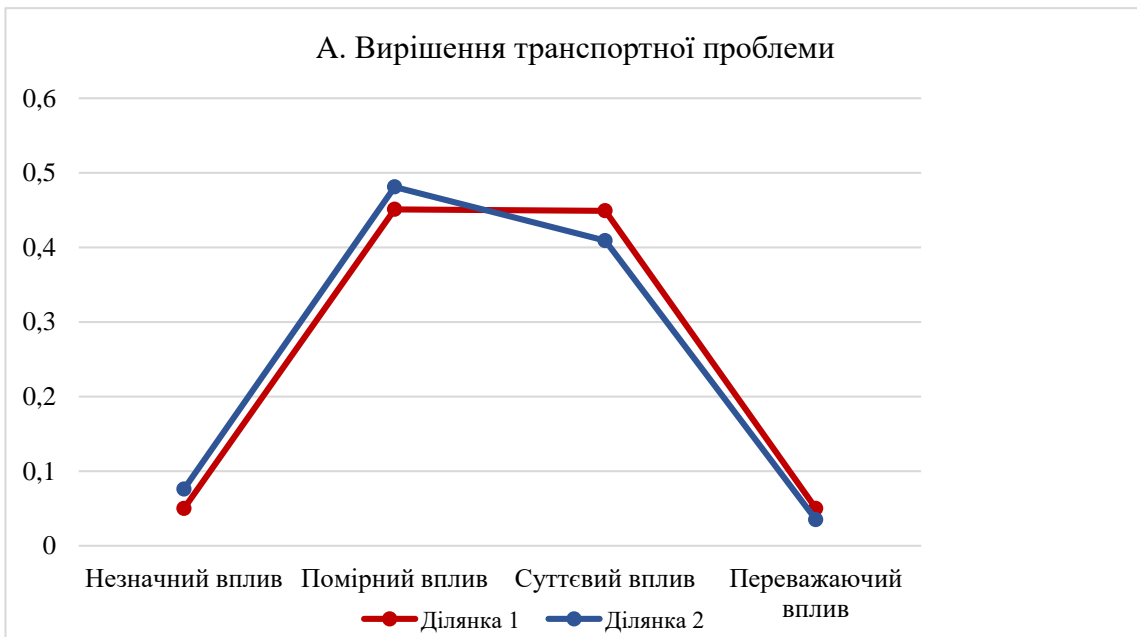


Рис. 3. Результати оцінювання варіантів за параметром «А. Вирішення транспортної проблеми»

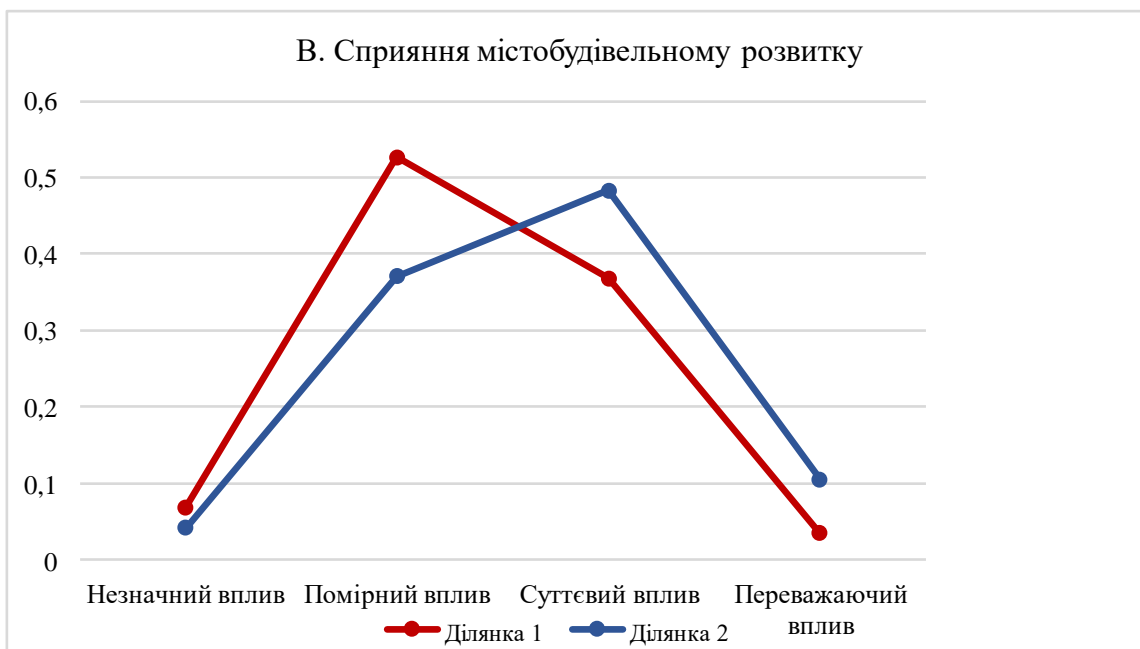


Рис. 4. Результати оцінювання ділянок за параметром «В. Сприяння містобудівельному розвитку»

Будівництво лінії метро вздовж південного узбережжя Одеси може значно активізувати інвестиції в будівництво, особливо в рекреаційну та туристичну інфраструктуру. Окрім розвитку наявних пляжних зон (площею до 56 га), можливе створення нових рекреаційних територій у південному напрямку, зокрема при подальшому продовженні лінії метро вздовж Фонтанської дороги. Часткове вирішення проблеми нестачі вільних земель можливе через заміну застарілих «хрущовок» та садибної забудови, хоча Генеральний план суттєво обмежує вибуття садибної забудови (на рівні 2,2%). Також перспективним є оновлення застарілих санаторіїв, готелів і баз відпочинку, які не відповідають сучасним стандартам і не витримують конкуренції з курортами сусідньої Туреччини.

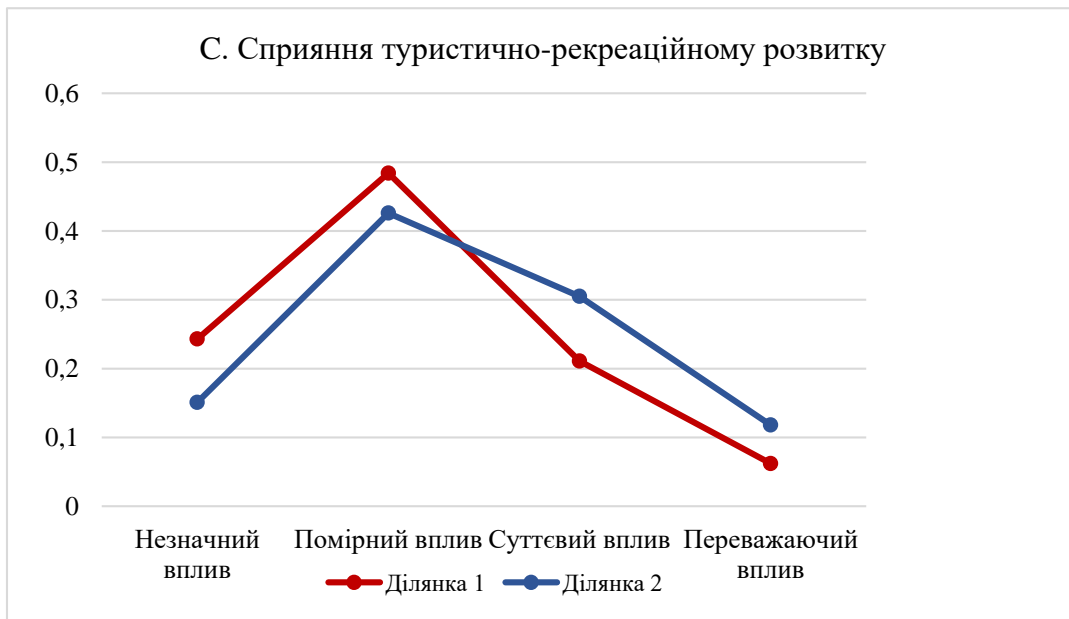


Рис. 5. Результати оцінювання ділянок за параметром «С. Сприяння туристично-рекреаційному розвитку»

Параметр «D. Мінімізація екологічних проблем» є ключовим для досягнення цілей «зеленого переходу» та кліматичної нейтральності, до яких прагне і Україна. Оскільки до 80% міських викидів спричинені автотранспортом, запуск метрополітену здатен значно скоротити їхній обсяг за рахунок вдосконалення системи пасажирських перевезень. Відчутне екологічне покращення прогнозується на обох маршрутах (рис. 6). Проте більш суттєвіший ефект очікується на ділянці 2 завдяки її близькості до моря, природних і курортних зон, зокрема Аркадії.

За параметром «E. Цивільний захист населення» оцінки для обох ділянок є подібними, з незначною перевагою ділянки 2 (рис. 7). В обох випадках переважають альтернативи параметрів «значна або часткова невідповідність потребам цивільного захисту». Проте станції метро а перехідні тунелі, можуть стати ефективними укриттями для цивільного населення й туристів. Невелика перевага ділянки 2 пояснюється більшою кількістю садибної забудови без укриттів та наявністю рекреаційної зони, де потреба в захисті є особливо актуальною.

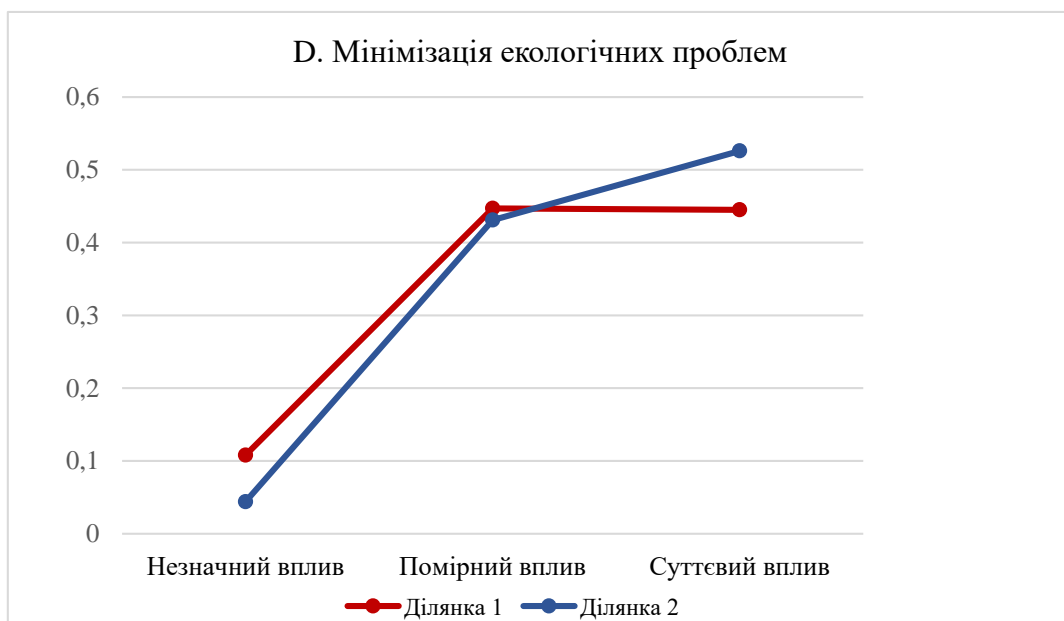


Рис. 6. Результати оцінювання ділянок за параметром «D. Мінімізація екологічних проблем»

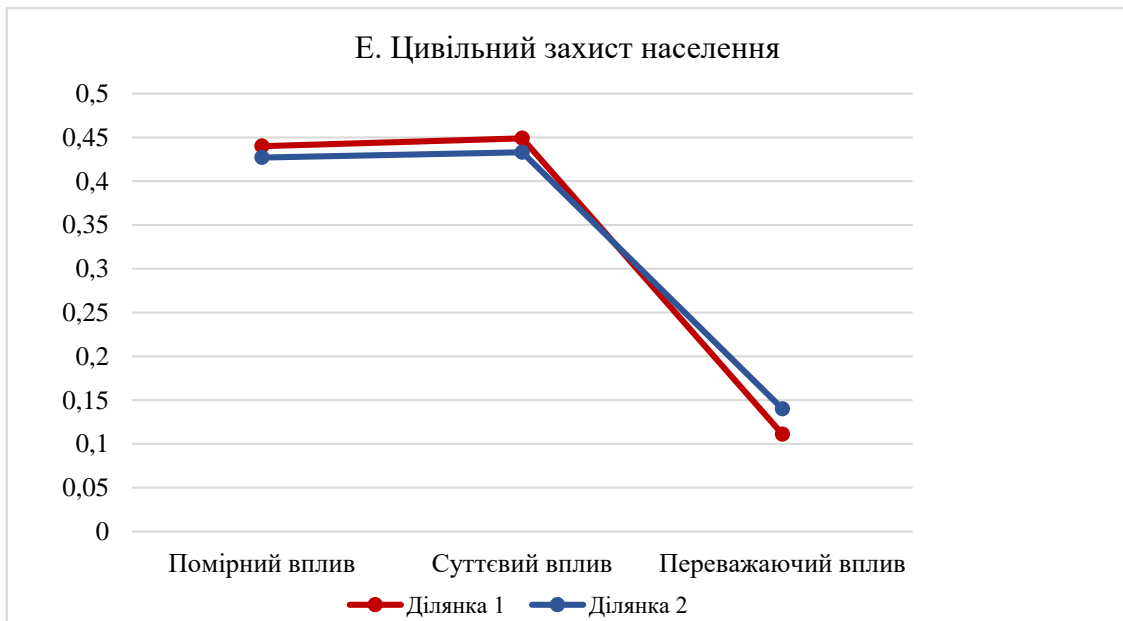


Рис. 7. Результати оцінювання ділянок за параметром «Е. Цивільний захист населення»

Для кращої візуалізації та порівняння впливу вибору ділянки на різні фактори було введено узагальнюючий коефіцієнт $w_{ratio} = (w_s + w_o) / (w_m + w_w)$. Він відображає відношення суми ваг альтернатив суттєвого w_s і переважаючого w_o впливу вибору ділянки на відповідний фактор, до суми ваг альтернатив помірної w_m і незначного w_w впливу вибору ділянки на аналогічний фактор. Чим вищий коефіцієнт, тим сильніший потенційний вплив вибору ділянки на відповідний фактор. Розраховані коефіцієнти w_{ratio} для обох ділянок представлені у вигляді діаграми на рис. 8.

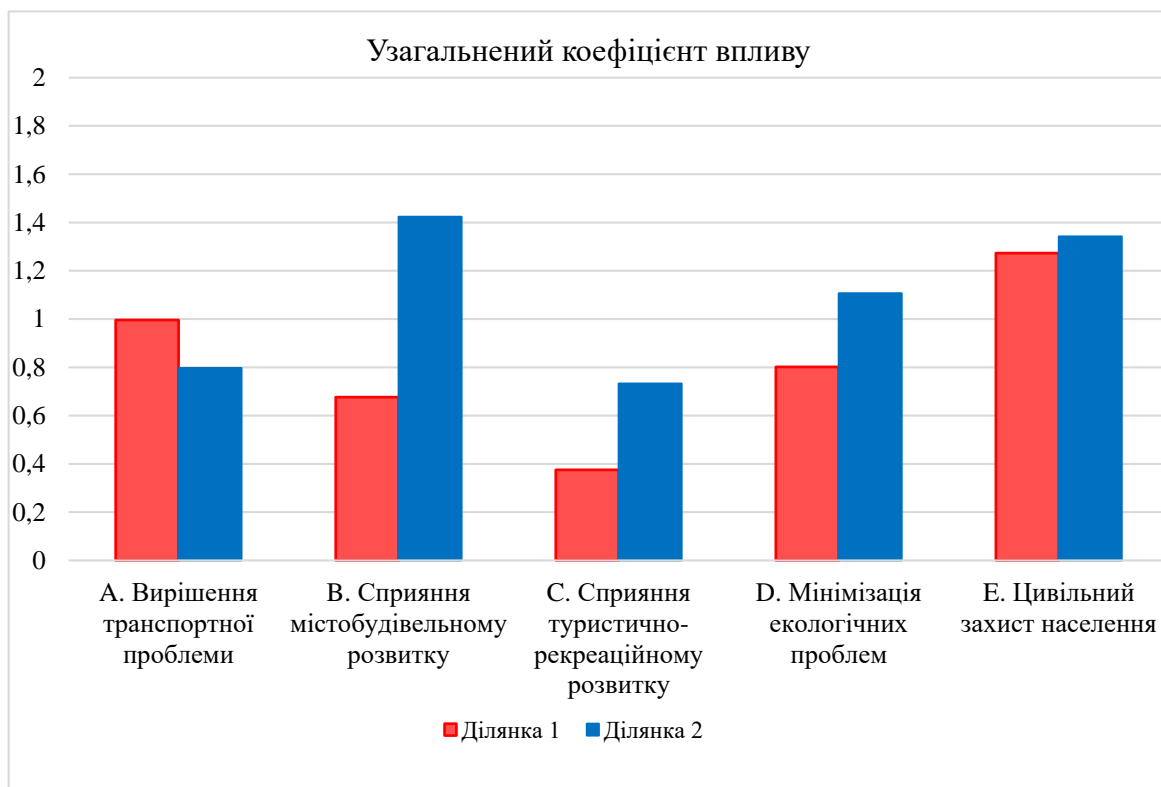


Рис. 8. Коефіцієнт впливу w_{ratio} обох ділянок для різних факторів

Результати моделювання свідчать, що альтернативна лінія метро (локація 2) краще узгоджується з ширшими ніж суто транспортними цілями стійкого міського планування. А саме з більшими інвестиційними перспективами будівництва, що зумовлено близькістю до моря, формуванням системи територій рекреаційного, оздоровчого та туристичного призначення, формуванням нових хабів для розміщення ділової активності, центр якої може переміститися з історичної в більш сучасну південно-східну частину Одеси. Також прибережна туристична й оздоровча зона потребує вирішення екологічних проблем, пов'язаних з мінімізацією викидів вихлопних газів на перевантажених автомагістралях. Зручна, наближена до морських рекреаційних об'єктів лінія метрополітену здатна суттєво скоротити кількість приватного автотранспорту на південних магістралях, у першу чергу на проспекті Шевченка та Фонтанській дорозі. Це призведе до ліквідації автодорожніх корок, зменшення простоїв і аварій, збільшить середню швидкість автомобільного руху й скоротить викиди газів, що сприятиме покращенню екологічної ситуації в місті. Таким чином включення лінії метро в існуючу систему автомобільного транспорту та трамвайних перевезень суттєво покращить умови їх функціонування за рахунок розвантаження критичних напрямків, а також зробить прибережний район більш стійким до воєнних загроз.

Говорячи про оцінку економічного та соціального впливу на вибір другого варіанту розміщення лінії метро (локація 2), слід зупинитися на перспективах південно-західної частини міста. Вирішення транспортної проблеми району може бути пов'язане із створенням низки човникових маршрутів міського транспорту в напрямку захід-схід до станцій осьової лінії метрополітену з утворенням тут транспортних вузлів. Це зменшить навантаження на основні автомагістралі в напрямку південь-північ (Люстдорфська дорога та вулиця Академіка Корольова), оскільки значна частина мешканців південно-західного району зможе користуватися метрополітеном, а також покращить свої можливості поїздки на працю чи відпочинок у південно-східну (приморську) частину міста. У разі подальшого розвитку Одеського метрополітену може бути збудована і лінія метро у напрямку Люстдорфської дороги (локація 1), але економічний вплив комплексного розвитку прибережної зони робить більш пріоритетною на сьогодні альтернативну лінію (локація 2).

Висновок. Повоєнний вихід Одеси на якісно новий рівень динамічного розвитку, вирішення багатьох транспортних, територіальних, екологічних, безпекових і соціальних проблем значною мірою може забезпечуватись будівництвом Одеського метрополітену. Очікувані по закінченню війни міжнародні інвестиції у великі інфраструктурні проекти в Україні можуть дати шанс реалізації цьому довгоочікуваному будівництву. При цьому в середньостроковій перспективі можна розраховувати лише на будівництво однієї осьової лінії метрополітену і важливо прийняти найбільш ефективно для розвитку міста рішення щодо її південного маршруту.

Серед перспективних напрямків структурування складних проблем і врахування багатьох критеріїв впливу слід зазначити модифікований авторами метод морфологічного аналізу, який знайшов застосування в складних задачах планування міст і розглядається як важливий процес перетворення наукових методів в управлінські дії. Розроблена системна методологія та інструментарій прийняття планувальних рішень у сфері підземної урбаністики та досвід застосування планувальних методик, що використовують наукове передбачення майбутнього розвитку міста були використані для побудови морфологічної моделі ділянок Одеського метрополітену. Аналіз результатів дає підстави вважати напрямком лінії метрополітену в напрямку Проспекту Т. Шевченка і Фонтанської дороги (ділянка 2) більш перспективним і пріоритетним, ніж базовий варіант у напрямку Люстдорфської дороги (ділянка 1). При цьому вирішення транспортної проблеми південних районів міста ув'язується з інвестиційними перспективами будівельного розвитку, формуванням цілісної системи територій рекреаційно-оздоровчого та туристичного призначення (яка могла б конкурувати з сусідніми країнами), формування нових ділових центрів для часткового переміщення ділової активності, комунікаційних і господарсько-управлінських функцій з історичного центру міста в його південну частину, створення непорушної єдиної тканини

міської спільноти та її соціальної інтеграції, а також більшої стійкості в умовах війни.

Розглянута морфологічна модель може бути доповнена системою інженерно-геологічних факторів впливу, розглянуті в ній параметри та їх альтернативи, а також вихідні фактори системного аналізу можуть доповнюватись і уточнюватись. Це дає міському самоврядуванню, державним органам влади, зацікавленим громадським організаціям та інвесторам ефективний інструмент для прийняття проектних рішень, виходячи із системних позицій.

Література

1. Herlihy P.. *Odessa: a History 1794-1914*. Cambridge: Harvard Ukrainian Research Institute, 1991. 432 p.
2. Lecke M., Sicher E. *Cosmopolitan Spaces in Odesa: A Case Study of an Urban Context (Ukrainian Studies)*. Boston: Academic Studies Press, 2023. 400 p.
3. Twain M. *The Innocents Abroad*. Wordsworth Editions, 2010. 464 p.
4. Пилявский В. *Архитектура Одессы: стиль и время*. Одесса: Optimum, 2010. 137 с.
5. Herlihy P. *Odessa Recollected: The Port and the People (Ukrainian Studies)*. Boston: Academic Studies Press, 2019. 256 p.
6. Лапкін О. Проблеми транспортної інфраструктури Одеси та проекти для їх вирішення. *Вісник ОНМУ*. 2019. Вип. 3 (60). С. 109–123. doi.org/10.33082/2226-1893-2019-3-109-123
7. Мироненко С.В., Венгер А.С. Дослідження транспортної структури міста Одеси. *Автомобільний транспорт*. 2017. №41. С. 105-109. doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2017.41.0.105
8. Генеральний план м. Одеси. Електронний ресурс. URL: <https://omr.gov.ua/ua/city/departments/uag/generalniy-plan-g-odessi/>
9. Glazebrook G., Newman P. The City of the Future. *Urban Planning*. 2018. 3(2). P. 1–20. doi.org/10.17645/up.v3i2.1247
10. Litman T. *Evaluating public transit benefits and costs: Best Practices Guidbook*. Victoria Transport Policy Institute, 2010. 141 p.
11. Spieler C. *Trains, Buses, People: An Opinionated Atlas of US transit*. Washington, DC: Island Press, 2018. 264 p.
12. Бондар Н. *Розвиток транспортної інфраструктури України на засадах державо-приватного партнерства: монографія*. К.: НТУ, 2014. 336 с.
13. Панкратова Н.Д., Гайко Г.І., Савченко І.О. *Розвиток підземної урбаністики як системи альтернативних проектних конфігурацій: Монографія*. К.: Наукова думка, 2020. 134 с.
14. Pardo C.F. Sustainable urban transport. In: *Shanghai Manual – A Guide for Sustainable Urban Development in the 21st Century*. United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA), 2010. P. 145–208.
15. Hollander J.B. *The First City on Mars: An Urban Planner’s Guide to Settling the Red Planet*. Springer, 2022. 286 p.
16. Zgurovsky M.Z., Pankratova N.D. *System analysis: Theory and Applications*. Springer, 2007. 475 p.
17. Панкратова Н.Д., Савченко І.О. *Морфологічний аналіз. Проблеми, теорія, застосування*. К.: Наукова думка, 2015. 245 с.
18. Haiko H., Savchenko I. Assessing territories for urban underground objects using morphological analysis-based model. In Springer book M. Zgurovsky and N. Pankratova (eds.), *System Analysis & Intelligent Computing*. Springer, 2022. P. 93–113. doi.org/10.1007/978-3-030-94910-5_6.
19. Pankratova N.D., Haiko H.I., Savchenko I.O. Morphological model for underground crossings of water objects. *System Research & Information Technologies*. 2021. № 4. P. 53–67. doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2021.4.04.
20. Ritchey T. *Futures Studies using Morphological Analysis*. Adapted from an article for the UN University Millennium Project: *Futures Research Methodology Series*, 2015. URL: <https://swemorph.com/pdf/futures.pdf>.

21. Pankratova N.D., Haiko H.I., Savchenko I.O. Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach. Springer, 2024. 256 p. doi.org/10.1007/978-3-031-47522-1.
22. Haiko H., Hollander J. B. & Savchenko I. Priority ranking of alternative Odesa metro plan variants: using modified morphological analysis method. International Journal of Urban Sciences. 2025. <https://doi.org/10.1080/12265934.2025.2452509>.
23. Гайко Г.І., Ган А.Л., Вапнічна В.В., Матвійчук І.О. Аналіз прогресивних конструктивних рішень підземних споруд цивільного захисту. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2024, № 26. С. 31-40. <http://bttrp.diit.edu.ua/issue/view/18555>.
24. Nazarenko I., Dedov O., Beryk I. et. al.; Nazarenko, I. (Ed.). Dynamic processes in technological technical systems. Kharkiv: PC Technology center, 196. 2021. doi.org/10.15587/978-617-7319-49-7.

References

- [1] P. Herlihy, *Odessa: a History 1794-1914*. Cambridge: Harvard Ukrainian Research Institute, 1991.
- [2] M. Lecke, E. Sicher, *Cosmopolitan Spaces in Odesa: A Case Study of an Urban Context (Ukrainian Studies)*. Boston: Academic Studies Press, 2023.
- [3] M. Twain, *The Innocents Abroad*. Wordsworth Editions, 2010.
- [4] V. Pilyavskiy, *Arkhitektura Odessy: stil' i vremya*. Odessa: Optimum, 2010.
- [5] P. Herlihy, *Odessa Recollected: The Port and the People (Ukrainian Studies)*. Boston: Academic Studies Press, 2019.
- [6] O. Lapkin, "Problemy transportnoii infrastruktury Odesy ta proiekty iikh vyrishennia", *Visnyk ONMU*, 3(60), pp. 109-123, 2019. doi.org/10.33082/2226-1893-2019-3-109-123.
- [7] S.V. Myronenko, A.S. Venger, "Doslidzhennia transportnoii struktury mista Odesy", *Avtomobilnyi transport*, vol. 41, pp. 105-109, 2017. doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2017.41.0.105.
- [8] Heneralnyi plan m. Odesy. [Online]. Available: <https://omr.gov.ua/ua/city/departments/uag/generalniy-plan-g-odessi/>. Accessed on September 21, 2024.
- [9] G. Glazebrook, P. Newman, "The City of the Future", *Urban Planning*, 3(2), pp. 1-20, 2018. doi.org/10.17645/up.v3i2.124.
- [10] T. Litman, *Evaluating public transit benefits and costs: Best Practices Guidbook*. Victoria Transport Policy Institute, 2010.
- [11] C. Spieler, *Trains, Buses, People: An Opinionated Atlas of US transit*. Washington, DC: Island Press, 2018.
- [12] N. Bondar, *Rozvytok transportnoii infrastruktury Ukrainy na zasadakh derzhavo-privatnoho partnerstva: monohrafiia*. Kyiv: NTU, 2014.
- [13] N.D. Pankratova, H.I. Haiko, I.O. Savchenko. *Rozvytok pidzemnoii urbanistyky iak systemy al'ternatyvnykh proiektnykh konfihuratsii: Monohrafiia*. Kyiv: Naukova dumka, 2020.
- [14] C.F. Pardo, "Sustainable urban transport". In: *Shanghai Manual – A Guide for Sustainable Urban Development in the 21st Century*. United Nations Department of Economic and Social Affairs (UNDESA), pp. 145-208, 2010.
- [15] J.B. Hollander, *The First City on Mars: An Urban Planner's Guide to Settling the Red Planet*. Springer, 2022.
- [16] M.Z. Zgurovsky, N.D. Pankratova, *System analysis: Theory and Applications*. Springer, 2007.
- [17] N.D. Pankratova, I.O. Savchenko, *Morfolohichni analiz. Problemy, teoriia, zastosuvannia*. Kyiv: Naukova dumka, 2015.

- [18] H. Haiko, I. Savchenko, "Assessing territories for urban underground objects using morphological analysis-based model", In: M. Zgurovsky and N. Pankratova (eds.), *System Analysis & Intelligent Computing*. Springer, pp. 93–113, 2022. doi.org/10.1007/978-3-030-94910-5_6.
- [19] N.D. Pankratova, H.I. Haiko, I.O. Savchenko, "Morphological model for underground crossings of water objects", *System Research & Information Technologies*, vol. 4, pp. 53-67, 2021. doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2021.4.04.
- [20] T. Ritchey, "Futures Studies using Morphological Analysis", Adapted from an article for the UN University Millennium Project: Futures Research Methodology Series, 2015. [Online]. Available: <https://swemorph.com/pdf/futures.pdf>. Accessed on September 21, 2024.
- [21] N.D. Pankratova, H.I. Haiko, I.O. Savchenko, *Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach*. Springer, 2024. doi.org/10.1007/978-3-031-47522-1.
- [22] H. Haiko, J. B. Hollander & I. Savchenko, "Priority ranking of alternative Odesa metro plan variants: using modified morphological analysis method", *International Journal of Urban Sciences*, 2025. <https://doi.org/10.1080/12265934.2025.2452509>.
- [23] H.I. Haiko, A.L. Han, V.V. Vapnichna, I.O. Matviichuk, "Analysis of progressive design solutions for underground civil protection structures", *Bridges and tunnels: Theory, Research, Practice*, 2024 (26), pp. 31-40. <http://btrp.diit.edu.ua/issue/view/18555>.
- [24] I. Nazarenko, O. Dedov, I. Bernyk et. al., Nazarenko, I. (Ed.). *Dynamic processes in technological technical systems*. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 196, 2021. doi.org/10.15587/978-617-7319-49-7.

**SYSTEM ANALYSIS OF THE ALTERNATIVE PROJECT CONFIGURATIONS
OF THE AXIAL LINE OF THE ODESA SUBWAY**

¹**Kovrov A.V.**, PhD, Professor,
rektor@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6037-6080
¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
Didrikhson st., 4, Odesa, 65029, Ukraine

²**Haiko H.I.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
h.haiko@kpi.ua, ORCID: 0000-0002-4263-5958

²**Savchenko I.O.**, PhD,
savil.ua@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0921-5425
²*National Technical University of Ukraine*
"Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Beresteisky ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

³**Nazarenko I.I.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
ii_nazar@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1888-3687
³*Kyiv National University of Construction and Architecture*
Air Forces ave., 31, Kyiv, 03037, Ukraine

⁴**Hollander J.**, Doctor of Architecture, Professor,
justin.hollander@tufts.edu, ORCID: 0000-0001-5148-7902
⁴*Tufts University*,
Boston alley, 506, Medford, MA, 02155, USA

Abstract. One of the most topical, yet insufficiently researched complex global problems is the regulation of urban space development, with the purpose of increasing comfort, ecological standards, life safety in constantly growing metropolises. The sustainable development concept for urban space highlights the capacity of the underground space to take on the functions of the most critical underground objects and communications, ensuring the minimization of the logistical, safety

and ecological problems, that in case of Odesa can be largely achieved by the construction of an axial (north to south) line of the Odesa subway. The post-war restoration of Odesa will provide the new opportunities for implementation of large infrastructural projects on the base of international partnership, including the construction of the subway.

The goal of the research is the systemic comparative evaluation of the alternative project configurations for the axial Odesa subway line, particularly its southern part.

The modified morphological analysis method was chosen to be the core method for the research, as it is an efficient system methodology tool under conditions of multi-criteria impacts and high uncertainty. The developed system methodology, and the planning decision-making tool set for underground urban development, as well as the experience of using planning methodologies that employ scientific foresight of the future city development, were involved in the construction of the morphological model for the Odesa subway locations.

The constructed morphological model allowed to assess the impact of 10 structural and functional factors, and process over 349 000 configurations of values to obtain the numerical estimates, and compare the alternative locations for the end stations of the Odesa subway. The impact on solving the transport problem, the promotion of the city development, the promotion of the recreational tourism development, the minimization of ecological problems, civil defense of society were considered. This provides the city government, the state authorities, the interested public organizations and investors with an efficient tool to make planning decisions based on systemic positions.

Keywords: underground construction, transport infrastructure, subway, system analysis, morphological model.

Стаття надійшла до редакції 14.03.2025

This work © 2025 by Kovrov A.V., Haiko H.I., Savchenko I.O., Nazarenko I.I., Hollander J. is licensed under CC BY 4.0

A HISTORICAL OVERVIEW OF THE DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL URBAN LIGHTING IN ODESA

Namchuk O.V., postgraduate student,
aleks.namchuk@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5185-8072
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture
4, Didrikhson str., Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. The article is dedicated to the history of the development of street lighting in the city of Odesa, an essential element of urban infrastructure and cultural-historical heritage. It explores the main stages of the establishment and modernization of lighting systems, starting from the late 18th century, when Odesa was just beginning to develop as a city, and continuing to the modern era, characterized by the introduction of energy-efficient technologies.

The paper provides a detailed analysis of the initial efforts to create traditional sources of street lighting, which began with the use of oil lamps. These provided a minimal level of illumination but laid the groundwork for further technical innovations and the development of the city's engineering infrastructure.

Special attention is given to the role of street lighting in shaping the urban environment, as well as to the impact of innovative technologies on the quality of urban life and public safety.

Based on the analysis of archival sources, historical documents, and modern research, the article outlines the stages of modernization of the city's street lighting. It describes how these changes reflect Odesa's socio-economic development and its integration into broader European urban processes.

In the mid-19th century, the city began using gas lamps, which significantly improved the quality of lighting and contributed to the more active development of central districts. Later, in 1897, Odesa made a leap into the future by introducing electric lighting, which resulted in significant resource savings and improved street safety.

In the 20th century, after severe destruction during World War II, the city's lighting infrastructure underwent large-scale reconstruction. In the second half of the century, new technologies were actively implemented, increasing the efficiency of the lighting system.

The modern stage of development is characterized by the transition to energy-efficient LED technologies, meeting the demands of ecology and the modern urban environment. Additionally, the article examines the use of "smart" lighting management systems that automatically adjust light intensity depending on conditions and are gradually becoming an integral part of Odesa's urban space.

The article contributes to a deeper understanding of the historical and cultural significance of urban lighting, its evolution, and its influence on the aesthetic appearance of Odesa.

Keywords: Odesa, street lighting, history, modernization, LED, gas lamps, electrification.

Introduction. Lighting is one of the key components of urban infrastructure, shaping the quality of life, driving economic development, and contributing to the cultural landscape. Odesa, founded in 1794 as a port city on the Black Sea coast, was originally designed with the most advanced urban planning principles of its time and prioritized the modernization of its infrastructure from the very beginning. However, the implementation of street lighting began only in 1798. One of the primary goals for the city's planners was to ensure safe and comfortable movement through the streets during nighttime hours. The history of street lighting in Odesa not only reflects the evolution of technical solutions but also illustrates the transformation of the urban environment under the influence of social and economic change.

Review of recent research and publications. The history of Odesa's urban lighting, as an integral part of its urban development, has attracted the attention of researchers from various fields, including history, architecture, technology, and sociology. In recent years, urban lighting has increasingly been

examined within a broader context, encompassing ecological, economic, and cultural dimensions. This section reviews the key contemporary studies and publications on the topic.

Writer Yakiv Mykhailovych Maistrovnyi, though not a professional historian, is a passionate admirer of Odesa. He authored the book "The history of Odesa in street names", which explores the city's history through the lens of its street names, offering insights into the development of urban infrastructure, including street lighting [1].

Among the most notable works dedicated to the history of lighting in Odesa is a study by Ivanov I. V. [2], which examines the formation of the city's infrastructure, including its lighting systems. The author emphasizes the role of lighting within the social structure of 19th-century Odesa, particularly in relation to the development of urban transport and public safety.

The work of Petrova O. M. [3] also addresses the topic of lighting. The author analyzes how the modernization of lighting systems influenced the development of public spaces, particularly squares and central streets.

Modern researchers have also paid considerable attention to the technological aspects of lighting. In an article by Kryvokulska N.V. [4], the energy efficiency of outdoor lighting installations is assessed. In another publication, Koshyk O.I. [5] examines modern energy-saving technologies applied in street lighting systems. The primary focus is on the efficiency of LED lighting and other innovative solutions that reduce electricity consumption while improving the quality of urban lighting. The author also discusses the prospects for implementing these technologies in the urban environment and their impact on the overall energy efficiency of external lighting systems.

Chinese researchers have analyzed the global increase in artificial light at night (ALAN) and its ecological impact. Their systematic review of existing studies highlights the importance of understanding the environmental role of artificial lighting in urbanized settings. They also explore strategies for addressing light pollution, its effects on living organisms, and potential management approaches to mitigate negative outcomes [6].

Numerous researchers have investigated the level of light pollution in the United States and Europe using night sky brightness data. These studies examine both the positive and negative effects of artificial lighting on the environment and human health. They also discuss how light pollution affects biodiversity and suggest measures to mitigate its consequences, including the adoption of more efficient lighting technologies [7].

Although these studies are not specifically focused on Odesa, they provide valuable recommendations for the modernization of lighting networks that are already being adopted in the city.

Volokin Ye.O. and Paliariev O.A., in their book, explore various aspects of Odesa's history, including the development of its infrastructure and street lighting [8]. Journalist Iryna Valentynova, in her article, also discusses the history of street lighting in Odesa [9].

Journalist Mariia Kotova explores the era of gas lanterns in Odesa, analyzing how many of them have survived to the present day and where they can still be found [10].

In recent years, the environmental aspect of lighting has taken a prominent place in academic discourse. The use of energy-saving technologies in urban lighting systems is examined in the works of both Ukrainian and European scholars. For instance, Pulka Ch.V. and Dziadykevych Yu.V. study the process of energy conservation and its components within the industrial sector, with a focus on international practices. The authors point out that national energy-saving policy involves increasing the extraction of fuel and energy resources, expanding the use of alternative and renewable energy sources, maximizing energy-saving potential, and aligning domestic legislation with EU standards. They argue for amendments to Ukraine's Energy Strategy up to 2030, emphasizing the need to prioritize the management of energy efficiency and conservation across various types of resources [11].

A 2022 report by the Odesa City Council highlights that the implementation of energy-efficient technologies has led to a 40% reduction in electricity costs for street lighting over the past five years.

An important dimension of urban lighting research concerns its impact on the cultural life of the city. Havyliuk O. P. examines the lighting of Odesa's historical landmarks and its role in the development of tourism [12]. The author notes that artistic illumination of architectural monuments, such as the Potemkin Stairs, has become a significant factor in enhancing the city's tourist appeal.

Recent studies confirm that the evolution of urban lighting in Odesa is a multifaceted subject encompassing historical, technological, ecological, and social aspects. Contemporary publications demonstrate that lighting modernization is not only a matter of comfort but also a crucial instrument for the sustainable development of the city. Future research in this area may focus on the integration of smart technologies and an assessment of their long-term impact on the urban environment.

Purpose and objectives of the study. The aim of this article is to explore the historical development of urban lighting systems in Odesa – from the earliest sources of artificial light in the 19th century to modern energy-efficient technologies – and to analyze their impact on the urban environment, economy, and culture.

The objectives of the study are as follows:

1. To analyze the historical stages of urban lighting development in Odesa, from oil lanterns to electric and modern LED systems.
2. To identify the main technological advancements implemented in Odesa and assess their impact on urban infrastructure development.
3. To examine the ecological and economic aspects of modern lighting systems, particularly the benefits of energy-efficient technologies.
4. To study the social and cultural impact of lighting on the lives of Odesa residents, the city's tourism appeal, and the formation of the urban environment.
5. To familiarize readers with the latest research and publications on urban lighting in the context of Odesa.
6. To formulate conclusions and recommendations for the further modernization of urban lighting systems, incorporating global best practices.

Materials and methods. This article is based on the following scholarly sources and materials:

- archival documents on the establishment of lighting systems in Odesa during the 19th century, including records related to the construction of gasworks and power stations;
- monographs and academic works detailing the stages of urban infrastructure development and analyzing social changes associated with the introduction of lighting;
- contemporary research, including publications on energy-efficient technologies and their implementation in Ukraine, as well as reports from the Odesa City Council that contain up-to-date data on the economic and ecological benefits of new lighting systems;
- ecological and technical sources: scientific articles on the impact of LED lighting on reducing energy consumption and CO₂ emissions; comparative reports on the efficiency of different lighting systems, which offer insights into the prospects for integrating smart technologies;
- cultural studies sources: materials addressing the impact of lighting on the city's tourism appeal and cultural identity.

Research methods. The following methods were applied in the preparation of this article:

1. Historical-analytical method: historical documents and academic research were analyzed to trace the stages of lighting system development in Odesa. This method made it possible to establish the chronology of changes and technical innovations.
2. Comparative analysis: various lighting technologies (gas lamps, incandescent bulbs, fluorescent lamps, and LED systems) were compared in terms of efficiency, cost-effectiveness, and their impact on the urban environment.
3. System analysis: the interconnection between lighting development and other aspects of the urban environment – such as transportation, architecture, and economy – was studied.

These methods provided a comprehensive approach to the topic, enabling a thorough analysis and the formation of well-founded conclusions.

Research findings. *Historical background of street lighting in Odesa.* In the 18th and 19th centuries, European cities were actively implementing street lighting as part of the broader modernization of urban infrastructure. Odesa was included in this general wave of development. From the outset, urban lighting was viewed as a key component of public safety, especially in port cities where nighttime activity in warehouses, docks, and workshops was common. As early as this period, Odesa's municipal budget included a designated expenditure line for "lighting of public buildings".

Moreover, Odesa's growth as a cultural and economic hub further encouraged the introduction of lighting systems. The first areas to be illuminated were places with high foot traffic – markets, administrative buildings, and major city thoroughfares.

Early lighting systems: oil lanterns. As previously mentioned, in the city's early years, street lighting was virtually nonexistent, making nighttime navigation difficult and unsafe. By the early 19th century, the need for urban lighting became evident due to Odesa's growing population and increasing economic activity. The first organized lighting appeared in the 1820s, primarily in the form of oil lanterns installed in the city center [13, p. 112]. A significant turning point in the development of Odesa's lighting came during the administration of Duke de Richelieu, who ordered the installation of the first 200 oil lanterns on central streets. This initiative was funded by the municipal government, with partial contributions from wealthy residents of Odesa. The lanterns used oil – typically vegetable oil or whale fat at first, later replaced by kerosene – as the source of light. Structurally, they were metal frames with protective glass to shield the flame from wind and precipitation. However, these lanterns had low luminous efficiency and required frequent maintenance, making their operation challenging.

The quantity of lanterns remained insufficient, and they were placed far apart, leaving large areas in darkness. By 1818, the number had increased to 400, but they operated under limited conditions – only until 2 a.m. and only during moonlit nights. Nevertheless, the city's rapid growth as a trade and administrative center demanded more robust lighting infrastructure. The lack of adequate lighting created discomfort for residents and visitors and contributed to rising crime rates. A significant milestone in Odesa's history occurred in that same year, 1818, with the creation of the city's first official street lighting organization. It was established by a wealthy merchant and entrepreneur, Yefym Kolosovsky, who was granted a concession by the city authorities to manage Odesa's urban lighting system. Kolosovsky assumed full responsibility for financing, installing, and maintaining the street lanterns. His organization's staff were tasked with refueling, lighting, and servicing the lamps on a regular basis.

As can be seen, the city's lighting operated on a commercial basis. Residents and business owners paid a fee to illuminate their properties, which helped cover the costs of installing and maintaining the lanterns.

Lighting contributed to a reduction in crime – a crucial factor for a port city – making Odesa more modern and comfortable for its time. This, in turn, enhanced the city's reputation as a progressive urban center. Nighttime lighting also stimulated economic activity, as trade and port operations could continue after dark.

Lanterns were installed primarily in the central parts of the city. For example, in the 1820s, oil lanterns illuminated Deribasivska Street, the Primorsky Boulevard, and the square in front of the City Hall. Despite their importance, oil-based lighting systems were labor-intensive. The lanterns had to be manually lit and extinguished each day and frequently refueled due to the fast-burning nature of oil. Additionally, the smoke and odor produced by burning oil caused considerable discomfort for local residents.

The number of lanterns remained limited, and large portions of the city continued to be shrouded in darkness, posing a threat to public safety.

The renowned historian, archivist, ethnographer, and cultural figure Apollon Skalkovsky, in his work *Notes on the Commercial and Industrial Forces of Odesa* (1865), described the situation as follows: "...unfortunately, Odesa is still illuminated very poorly – by simple lanterns, half of which are filled with wood oil, and the others with alcohol. However, steps are already being taken to improve this vital area of municipal infrastructure".

In the 19th century, various types of fuel became available, including alcohol. Alcohol-based lighting, though short-lived, represented an interesting and valuable chapter in the city's urban development. Between 1854 and 1859, alcohol lanterns were used experimentally, and by 1866, they had completely replaced oil lanterns. Alcohol burned longer than oil, produced a brighter flame, and was easier to transport and store. However, alcohol was highly flammable, increasing the risk of fires. It also presented a temptation to lamplighters and workers in the lighting industry. Numerous cases

of theft and misuse of alcohol were reported, prompting the municipal authorities to search for alternative lighting solutions.

The transition to gas lighting. In the mid-19th century, Odesa became a pioneer in the implementation of gas lighting [3, p. 145]. This was made possible by the construction of a municipal gasworks in 1864 on Polish Descent (Polskyi Uzviz). According to the research of O. Petrova, the establishment of the gas plant not only improved lighting quality but also contributed to the modernization of the city's infrastructure [3, p. 145]. The project was developed under the supervision of foreign engineers who specialized in gas technology and was equipped with state-of-the-art production equipment for the time. This marked a significant milestone in the history of the city. Gas lanterns proved to be significantly more efficient, convenient, and cost-effective than oil lamps. The Polish Descent was selected for the plant's location due to its strategic position: proximity to the port ensured access to necessary resources, while its distance from residential areas minimized environmental impact on residents. At the plant, coal was heated in special retorts without access to air, producing gas that was then purified and distributed through pipelines to street lanterns throughout the city.

Gas lanterns provided longer and brighter illumination, which was particularly important for a bustling port city. They became a symbol of urban modernization. By the 1870s, major streets such as European (formerly Katerynynska), Deribasivska, and Rishelievka, as well as the squares near City Hall and the Opera Theater, were lit by gas lanterns. Eventually, these lanterns spread to other districts. By the end of the 19th century, a large portion of Odesa was equipped with a full-fledged gas lighting system.

Gas lighting on city streets was considered a true achievement and a source of pride, frequently highlighted in various travel guides. For example, a description of Odesa from the 1870s in the Guide to the Balneological Institutions of Odesa reads: "Throughout the city, the roadsides are lined with trees and gas lanterns, so that in summer, Odesa's streets resemble beautiful boulevards".

According to preserved documents, the construction of the gasworks and the production and installation of lamp posts were financed by the Odesa Gas Lighting Joint-Stock Company – one of the first enterprises of its kind, which played a key role in the modernization of urban infrastructure. The founding of the company was the result of collaboration between local authorities, entrepreneurs, and European engineers. To finance the gasworks project, the company issued shares and raised capital from wealthy residents of Odesa as well as foreign investors. The company not only oversaw the production of gas but also handled the installation, maintenance, and repair of the lighting network. It became a symbol of technological advancement. Its operations contributed to the development of infrastructure, the creation of jobs, and the attraction of further investment into the city. Lighting costs were covered by both the municipal budget and private individuals who installed gas lanterns in their homes and buildings. Gas lighting significantly improved the quality of life for Odesa's residents: the streets became safer, and the aesthetic appeal of the city increased.

By 1877, the city's lighting expenditures amounted to 44.160 rubles. In 1881, each resident paid an average of 22 kopecks per year for public lighting.

However, gas lighting also had its limitations. The networks required regular technical maintenance, and gas leaks occasionally caused fires. Despite its development, the city was still not adequately illuminated overall. In poorer neighborhoods, particularly those far from the city center, and in suburban areas, gas lighting had not been introduced even by the end of the 19th century. These areas remained in darkness, lit only by kerosene lamps – 1.560 of which were recorded in use by 1894. Kerosene lighting was common in Moldavanka, Bugaivka, Sakhalinchyk, Melnitsi, Peresyp, parts of Slobidka, and along the roads to Small and Great Fontan. In suburban areas, lighting was provided at the expense of local property owners.

Some street gas lanterns – now over 150 years old – can still be seen today on a number of Odesa's streets, including European (formerly Katerynynska), Deribasivska, Pastera, and Langeronivska.

The experience of the Odesa Gas Lighting Joint-Stock Company in managing urban lighting laid the groundwork for the transition to electrification.

Electrification: a revolution in Odesa's street lighting. At the end of the 19th century, Odesa began transitioning to electric lighting. The first electric street lamps were installed in 1897 on Primorsky Boulevard, one of the city's most central and symbolic boulevards. These first lamps were known as Yablochkov candles, named after the scientist who invented them. The Yablochkov candle was one of the earliest types of electric arc lamps, developed in 1876 by engineer Pavel Yablochkov. Electric lighting quickly gained popularity due to its brightness, reliability, and durability. It significantly improved street safety and became a symbol of progress.

A landmark event in the city's development was the construction of the new Opera Theater (1884–1887), which became one of the first buildings in Odesa to be illuminated by electric light.

The introduction of electric lighting in Odesa marked another milestone in its technological evolution. The city was among the first in the southern region to implement electric streetlights at the turn of the 20th century. This was made possible thanks to the construction of a power station [2, p. 78].

In 1887, the city authorities constructed a remarkable facility on Staroportofrankivska Street – Ukraine's first power station designed specifically to supply electricity for urban street lighting. It was also built to illuminate the new Opera Theater, the Odesa Port, and to provide power for 600 electric lamps used by private subscribers. The plant was equipped with steam-driven generators that produced electricity. The first electric lamps appeared on Odesa's main streets: Deribasivska, Italian Street (formerly Pushkinska), European Street (formerly Katerynynska), Langeronivska, and in the Odesa Port.

By 1910, electric lamps had gradually replaced gas ones, expanding not only across central streets but also into residential neighborhoods. Odesa was also a pioneer in using electricity to light public buildings and landmarks, such as the monument to the Duke de Richelieu. Early 20th-century publications include comments like: "The streets are lit by gas, and some by electricity. Almost all government and private institutions, as well as many shops, use electric lighting" (1911). Yet, just ten years earlier, a guidebook titled *The Odessite* still stated: "At night, the streets are lit by gas lanterns". By 1911, electric lights illuminated Primorsky Boulevard and the main alley of Taras Shevchenko Park.

Electric lamps were installed at gates and street corners to highlight house numbers, street names, and the number of the police district the building belonged to – an old and practical tradition.

In the early 20th century, the Odesa Railway Station was also lit by electric lamps. Unfortunately, the original station building did not survive – it was destroyed during World War II. A 1899 city guide described it as follows: "The station façade is in Renaissance style. The interior halls are distinguished by comfort and luxury, with the first-class lounge being particularly splendid. There are three access roads to the station, with the main entrance facing the park. The station is lit by electricity".

As early as 1887, the port area had separate electric lighting. By 1911, 60 lamps were installed there, each with a power output equivalent to 2.000 candles. This significantly improved nighttime navigation and safety in the port. As noted in the publication *Odesa Cicérone*: "The cable supplying power to the piers and embankments is laid underground, while the lighting for the outer piers is supplied through underwater cables".

Electrification coincided with the rapid development of Odesa's urban transport system, which further contributed to the expansion of street lighting across the city.

The Soviet period: standardization and new technologies. After the 1917 Revolution, the establishment of Soviet power, and the introduction of a new economic system, active efforts were launched to electrify major infrastructure and street lighting in large cities such as Odesa. In the 1920s, plans were developed for the full electrification of the city as part of the nationwide GOELRO plan (State Commission for Electrification), an ambitious initiative aimed at electrifying all sectors of the economy, including industry, agriculture, transport, and residential areas.

Under this program, Odesa undertook modernization of its electrical networks and expansion of energy supply for the lighting of streets, buildings, and key urban infrastructure. As part of the effort, the city received new power stations and saw expansions of existing ones, allowing a greater number of neighborhoods to be connected to electric lighting. Improvements to the grid enabled broader

illumination of streets and key public spaces. Increased power plant capacity aimed to enhance residents' access to electricity and support the connection of new industrial enterprises. This contributed to the development of both industry and municipal services. Thanks to the program, Odesa's citizens received what was then considered modern lighting for parks, squares, theaters, and cultural institutions. This significantly improved the city's nighttime appearance and public perception.

In the 1930s, incandescent lamps were introduced and became the primary source of street lighting in Odesa up until the Second World War. Their main drawback was high energy consumption, which led to additional expenditures from the municipal budget. After the war, fluorescent lamps began to be used. These were far more energy-efficient and capable of providing bright illumination while consuming significantly less power – an especially important factor in the postwar years, when rebuilding the economy and meeting energy demands for urban infrastructure were pressing concerns. Fluorescent lamps delivered more uniform and brighter lighting compared to incandescent bulbs, improving both comfort and safety on the streets. Their broad light spectrum made the urban environment more pleasant for residents and also enhanced visibility for vehicles, as roads and intersections became better lit. In addition to energy savings, fluorescent lamps had a much longer service life than incandescent ones, which helped reduce maintenance and replacement costs. This contributed to lowering the financial burden on the city for maintaining the street lighting system.

In the 1960s and 1970s, high-pressure mercury and sodium vapor lamps were actively implemented. Mercury lamps gained popularity due to their energy efficiency and ability to emit bright light. They were used for lighting large areas, streets, bridges, and other infrastructure, particularly in the city center. Mercury lamps emitted a cool-toned light, which, while effective for visibility, was often uncomfortable for the eyes. As a result, they were primarily used for street lighting rather than in residential buildings or public interiors. Sodium lamps, by contrast, were significantly more energy-efficient than mercury lamps and produced a bright yellow glow. Thanks to their high luminous efficacy, they became the main type of street lighting in Odesa during the 1970s. These lamps reduced electricity costs and improved the efficiency of the city's lighting network. Streets and public squares were more evenly and brightly illuminated, which increased safety and enhanced Odesa's nighttime appearance. Municipal services began actively replacing outdated gas and early electric lamps with new mercury and sodium fixtures, improving both the ecological and energy performance of the city's lighting infrastructure.

During this same period, the lighting of Odesa's more remote districts also began, although the development was gradual and dependent on energy resources and funding. Until then, the focus had been on central areas, where the main traffic arteries, major squares, and public venues were located. However, as the city's boundaries expanded and the population grew, lighting needs in outlying neighborhoods became more pressing. Priority was given to major streets and roads connecting the city center to peripheral areas. This applied to both residential and industrial zones, with significant emphasis on creating safe conditions for vehicular and pedestrian traffic. In the late 1960s and 1970s, new residential neighborhoods such as Cheryomushki, Tairovo, and Kotovskiy were actively developed. Street lighting was gradually extended to these areas as well. These new districts were typically equipped with more modern lighting systems, including sodium and mercury lamps, which provided high-quality light with reduced energy costs.

Lighting also became increasingly important in the city's industrial zones. This ensured safe conditions for workers and operations that continued into nighttime hours. These sites were often equipped with higher-powered lamps – usually mercury or sodium vapor – to provide sufficient illumination for industrial processes and overall safety.

During the Soviet period, the scale of nighttime lighting expanded significantly, encompassing public buildings, residential districts, industrial zones, and recreational areas.

The modern stage: LEDs and smart technologies. Since the beginning of the 21st century, Odesa has embraced modern lighting technologies, including the widespread use of LED (light-emitting diode) street lamps, which now illuminate not only the city center but also its more remote neighborhoods. LED lighting offers not only brightness and durability but also high energy efficiency, which is vital for the city's environmental sustainability.

Odesa has been actively installing LED lamps along central streets and at key historical sites such as Yevropeiska Street (formerly Katerynynska), Derybasivska Street, the Potemkin Stairs, and Prymorsky Boulevard. These upgrades have enhanced visibility for both pedestrians and vehicles while reducing electricity costs. Compared to traditional lamps, LED fixtures provide high-quality lighting with lower energy consumption. In Odesa's parks – such as Shevchenko Park, Victory Park, and Mark Twain Park – as well as along the Health Route, LED lamps have been installed to ensure energy-efficient lighting during evening hours. This has not only improved safety for park-goers but also enhanced the aesthetic appeal of recreational and coastal areas. Outlying neighborhoods and new developments – such as Tairovo, Cheryomushky, and Kotovskyi – are also seeing increasing deployment of LED streetlights. These fixtures are being installed along main roads, at intersections, and throughout modern residential complexes, helping to reduce energy consumption while providing comfortable lighting for residents.

In today's context, greater attention is being given to the ecological impact of urban lighting. As highlighted in a study by V. Zhurilo, the use of energy-efficient LED systems can reduce energy consumption by up to 40% and significantly lower CO₂ emissions [14, p. 34].

Modernization efforts now include the integration of smart technologies that automate the management of street lighting. These innovations improve resource efficiency and contribute to a more sustainable urban environment [12, p. 45]. Light pollution, after all, disrupts the natural cycles of light and darkness that all human biological systems depend on, potentially causing behavioral, physiological, and ecological disturbances [15].

In recent years, lighting systems have been introduced that automatically adjust brightness based on the time of day, weather conditions, and traffic levels. These smart systems are especially common on major roadways, in pedestrian zones, and throughout the historic city center.

In addition to practical improvements, Odesa has introduced artistic lighting installations that adorn main streets, historic buildings, and tourist attractions. These installations create a festive atmosphere and serve as part of broader cultural and artistic initiatives. They are typically displayed during major holidays, festivals, and citywide events, playing a role in both urban development and tourism promotion. Each year, Odesa is decorated with large-scale light installations to celebrate the New Year and Christmas. Streets, squares, parks, and key landmarks – such as Derybasivska Street – are lit with thousands of lanterns and colorful lighting elements. Bright arches, holiday trees, and decorative figures like snowmen, stars, and reindeer are placed throughout the city. These festive elements have become a beloved part of the holiday atmosphere and are popular photo spots for both tourists and locals. They not only foster a welcoming ambiance but also attract visitors, supporting the growth of the local economy.

The Potemkin Stairs, one of Odesa's most iconic architectural landmarks, have repeatedly served as a canvas for light shows and artistic installations. During cultural events such as the Odesa International Film Festival, the staircase is often adorned with interactive light projections that shift in color and create striking visual effects, highlighting the monument's grandeur. These displays not only enhance the city's cultural image but also serve as a powerful attraction for tourists and a means of promoting local events.

Odesa also maintains its historical heritage by restoring antique street lamps and adapting them to modern standards. On Prymorsky Boulevard, for instance, stylized 19th-century lanterns are still in use, preserving the historic atmosphere of the area while integrating contemporary lighting technologies.

Conclusions. The history of Odesa's urban lighting is a vivid illustration of technological advancement, urban planning, and social transformation spanning more than two centuries. From the earliest attempts at lighting the streets with oil lamps to the implementation of cutting-edge LED technologies, the city has consistently served as a platform for innovation and forward-thinking solutions. Each phase of this evolution has contributed to the improvement of residents' quality of life.

The development of Odesa's lighting system is deeply intertwined with broader trends in technological progress, economic conditions, and public needs, making its story unique and exemplary. Urban lighting in Odesa reflects not only technical innovation but also the complex relationship between technology, culture, and everyday urban life. Studying this process offers

valuable insight into how societal priorities shift over time, how cities adapt to emerging technologies, and how global trends influence local urban development. Odesa's experience is particularly instructive for understanding how cities can integrate modern technologies while preserving their historical heritage and cultural identity. Today, the city continues to embrace innovation, skillfully balancing respect for its past with the adoption of advanced technologies.

To fully document and understand this evolution, it is essential to study historical archives, municipal records, planning projects, and technical documentation from different periods. This would allow the construction of an accurate chronology of Odesa's lighting systems, identification of the key figures involved in technological transitions, and a deeper understanding of how urban infrastructure has changed over time.

Modern technologies should be leveraged to create interactive maps that trace the transformation of Odesa's lighting infrastructure across different historical eras. These maps could include reconstructions of old lighting systems and show how they correspond to the city's architectural and spatial development.

Another important area of study is the impact of lighting on social life, culture, and the local economy. For instance, research could explore how new lighting systems encouraged nightlife, supported commercial activity, enhanced public safety, and shaped the aesthetic perception of the cityscape.

Further research is also needed into the role of Odesa's factories in manufacturing lighting equipment, as well as the import and adaptation of foreign technologies. This line of inquiry could help assess Odesa's contribution to the development of the electrical engineering sector.

References

- [1] Ya. M. Majstrovij, *Istoriya Odesi v nazvah vulic*, Odesa: Plaske, 2012.
- [2] I. V. Ivanov, *Istoriya Odesi: urbanistichnij kontekst*, Kiyiv: Naukova dumka, 2015.
- [3] O.M. Petrova, *Miske seredovishe XIX stolittya: sociokulturni aspekti*, Odesa: Astroprint, 2017.
- [4] N.V. Krivokul'ska, "Porivnyal'nij analiz energetichnoyi effektivnosti dzherel svitla v sistemah zovnishnogo osvittlennya", *Zbirnik tez VIII Vseukrayinskoyi studentskoyi naukovotekhnichnoyi konferenciyi "Prirodnichi ta gumanitarni nauki. Aktualni pitannya"*, Ternopil: TNTU, 2015. T. 1. pp. 215–216.
- [5] O.I. Koshik, "Energozberigayuchi tehnologiyi u ustanovkah vulichnogo osvittlennya", *Zbirnik tez dopovidej IX Mizhnarodnoyi naukovotekhnichnoyi konferenciyi molodih uchenih ta studentiv "Aktualni zadachi suchasnih tehnologij"*, Ternopil: TNTU, 2020. T. 2. pp. 112.
- [6] Q. Hao, L. Wang, G. Liu, Z. Ren, Y. Wu, Z. Yu, J. Yu, "Exploring the construction of urban artificial light ecology: a systematic review and the future prospects of light pollution", *Environmental Science and Pollution Research*, no. 30, pp. 77595-77613, 2023.
- [7] F. Falchi, R. Furgoni, T.A. Gallaway, N.A. Rybnikova, B.A. Portnov, K. Baugh, P. Cinzano, C.D. Elvidge, "Light pollution in USA and Europe: The good, the bad and the ugly", *Journal of Environmental Management*, no. 248, 109227, 2019.
- [8] Ye. Volokin, O. Palariyev, *Istoriya Odesi v pam'yatnikah i skulpturah*, Odesa: Chornomor'ya, 2020.
- [9] Irina Valentinova, "Cej den v Odesi: yak osvitlyuvani vulici mista". [Online]. Available: <https://odessa-life.od.ua/article/history/jetot-den-v-odesse-kak-osveshhali-ulicy-goroda> Accessed on: February 26, 2025.
- [10] Mariya Kotova, "Vulichne osvittlennya Odesi: skilki v misti zalishilosya gazovih lihtariv". [Online]. Available: https://odessa-life.od.ua/article/ulichnoe-osveshhenie-odessy-skolko-v-gorode-ostalos-gazovyh-fonarej?utm_source=chatgpt.com Accessed on: March 15, 2025.
- [11] Ch.V. Pulka, Yu.V. Dzyadikovich, "Energozberizhennya – osnovnij trend energetichnoyi politiki pidpriyemstv: zarubizhnij dosvid", *Galickij ekonomichnij visnik*. Tom 68, no. 1, pp. 16–25, 2021.
- [12] O.P. Gavrilyuk, "Svitlo yak element urbanistichnogo seredovisha: Odesa v XXI stolitti", *Arhitektura i suchasnist*, no. 2, pp. 12–19, 2020.

- [13] T.V. Melnik, *Rozvitok inzhenernoyi infrastrukturi ukrayinskih mist u XIX–XX stolittyah*, Lviv: Svit, 2018.
- [14] V.M. Zhurilo, "Ekologichni aspekti miskogo osvittlennya v Ukrayini", *Ekologiya mista i tehnologii*, no. 4, pp. 22–31, 2020.
- [15] U. Candolin, "Coping with light pollution in urban environments: Patterns and challenges", *Science*, vol. 27, no. 3, 2024.

ІСТОРИЧНИЙ ОГЛЯД РОЗВИТКУ ШТУЧНОГО МІСЬКОГО ОСВІТЛЕННЯ В М. ОДЕСА

Намчук О.В., аспірантка,
aleks.namchuk@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5185-8072
Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дітріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. Стаття присвячена історії розвитку вуличного освітлення в місті Одеса, яке є важливим елементом міської інфраструктури та культурно-історичної спадщини. Досліджено основні етапи становлення та модернізації освітлювальних систем, починаючи з кінця XVIII століття, коли Одеса тільки формувалася як місто, і до сучасного періоду, що характеризується впровадженням енергоефективних технологій. У роботі детально проаналізовані перші зусилля у створенні традиційних джерел вуличного освітлення, які розпочалися з використання олійних ламп, які забезпечували мінімальний рівень освітлення, проте заклали основу для подальших технічних інновацій та розвитку інженерної інфраструктури міста.

Увага приділяється також ролі вуличного освітлення у формуванні урбаністичного середовища, впливу інноваційних технологій на якість міського життя та безпеку.

На основі аналізу архівних джерел, історичних документів та сучасних досліджень окреслено етапи модернізації вуличного освітлення міста. Описано, як ці зміни відображають соціально-економічний розвиток Одеси та її інтеграцію в загальноєвропейські урбаністичні процеси.

У середині XIX століття в місті почали використовувати газові лампи, що значно покращило якість освітлення і сприяло активнішому розвитку центральних районів. Згодом, у 1897 році, Одеса зробила крок у майбутнє, впровадивши електричне освітлення, яке забезпечило значну економію ресурсів і покращило безпеку на вулицях.

У XX столітті, після значних руйнувань під час Другої світової війни, освітлювальна інфраструктура міста зазнала масштабної реконструкції. У другій половині століття активно впроваджувалися нові технології, що підвищили ефективність системи освітлення.

Сучасний етап розвитку характеризується переходом до енергоефективних LED-технологій, які відповідають потребам екології та сучасного міського середовища. Крім того, у статті розглянуто використання «розумних» систем управління освітленням, які дозволяють автоматично регулювати інтенсивність світла залежно від умов та поступово стають невід'ємною частиною міського простору Одеси.

Стаття сприяє глибшому розумінню історико-культурного значення міського освітлення, його еволюції та впливу на естетичний вигляд Одеси.

Ключові слова: Одеса, вуличне освітлення, історія, модернізація, LED, газові лампи, електрифікація.

Стаття надійшла до редакції 28.03.2025

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

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПОЛЕГШЕНОГО ЗБІРНО-МОНОЛІТНОГО ПЕРЕКРИТТЯ З ПОЛІСТИРОЛЬНИМИ ВСТАВКАМИ¹Буцька О.Л., к.т.н., доцент,

butska.olena@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4377-3746

¹Махінько М.М., к.т.н., доцент,

makhinko.mykola@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5541-8672

¹Зезюков Д.М., к.т.н., доцент,

denis.zezjukov@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7451-992X

¹ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»
Українського державного університету науки і технологій
вул. Архітектора Олега Петрова, 24а, м. Дніпро, 49600, Україна

Анотація. Стаття присвячена оптимізації параметрів полегшеного збірно-монолітного перекриття з полістирольними вставками, що є одним з перспективних конструктивних рішень у будівництві. Використання полістирольних вставок дозволяє значно зменшити масу конструкції перекриття та знизити витрати на матеріали, що робить таку технологію актуальною в умовах сучасного будівництва. Однак для досягнення оптимальних технічних і економічних показників необхідно правильно вибрати параметри конструкції, зокрема параметри вставок, тип армування та геометричні характеристики перекриття. Метою дослідження є оптимізації таких параметрів, що дозволить досягти максимального поєднання економічної ефективності, несучої здатності та деформативності конструкції.

У рамках дослідження були розглянуті кілька варіантів конструкцій з полістирольними вставками різних товщин та типів армування. Для цього були використані методи математичного моделювання за допомогою програмного забезпечення ПК Ліра. У результаті проведених розрахунків встановлено, що варіанти конструкцій з товщиною полістирольних вставок від 150 до 180 мм мають найкраще співвідношення між економічною вигодою та технічними характеристиками, оскільки вони дозволяють значно зменшити споживання матеріалів (бетону та арматури) без зниження несучої здатності і надійності перекриття.

Одним із важливих результатів є виявлення оптимальних варіантів армування для кожного з розглянутих варіантів перекриттів, що дозволяє знизити витрати на армування та зберегти міцність конструкції. Дослідження також показали, що збільшення товщини полістирольних вставок після певного порогу призводить до зростання вартості конструкції, що не виправдовується з точки зору економії.

Враховуючи отримані результати, можна зробити висновок, що полегшені збірно-монолітні перекриття з полістирольними вставками є ефективним і економічно вигідним рішенням для сучасного будівництва, при умові правильного вибору конструктивних параметрів. Однак для досягнення максимального ефекту необхідно враховувати не лише механічні характеристики, а й економічні та технологічні фактори, які впливають на процеси проектування та будівництва. Перспективи подальших досліджень полягають у вивченні довговічності таких конструкцій за різних умов експлуатації, а також в оптимізації процесу монтажу для зниження трудових витрат та підвищення швидкості виконання будівельних робіт.

Ключові слова: збірно-монолітне перекриття, полегшене залізобетонне перекриття, полістирольні вставки, оптимізація конструкції перекриття.

Вступ. У сучасному будівництві питання зниження витрат на матеріали, підвищення теплоізоляційних характеристик конструкцій та забезпечення їх високої міцності є надзвичайно актуальними. Одним з перспективних напрямків є використання полегшених збірно-монолітних

перекриттів, що поєднують переваги як збірних, так і монолітних конструкцій. Зокрема, використання полістирольних вставок у перекриттях дозволяє значно зменшити масу конструкцій, підвищити їх теплоізоляційні властивості, а також знизити витрати на матеріали, що робить їх економічно вигідними і технічно ефективними рішеннями для сучасного будівництва.

Застосування полістирольних вставок дозволяє отримати конструкції з високими теплоізоляційними властивостями при меншій вазі перекриттів, що сприяє зниженню загальної маси будівельних елементів і, відповідно, витрат на транспортування та монтаж. Крім того, така технологія забезпечує значну економію на бетоні та арматурі, що, в свою чергу, дозволяє зменшити собівартість будівництва.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні десятиліття у будівельній галузі спостерігається активний пошук рішень, що дозволяють одночасно зменшити матеріаломісткість залізобетонних конструкцій та покращити їх теплотехнічні характеристики. Одним із перспективних напрямів є використання полегшених залізобетонних перекриттів з пінополістирольними вставками або порожниноутворювачами.

Детальні експериментальні дослідження властивостей таких перекриттів проводили Мельник І.В., Сорохтей В.М. тощо. [1, 2]. Ними доведено, що введення пінополістирольних вставок у монолітне залізобетонне перекриття дозволяє значно знизити масу конструкції (до 20–25%) без істотного зменшення несучої здатності. У працях Литвиняка О.Я. [3] розглянуто вплив легких бетонів (зокрема пінобетону) на несучу здатність і тріщиностійкість збірно-монолітних плит. В інших українських дослідженнях [4–6] підкреслено технологічну ефективність впровадження подібних рішень під час реконструкцій та в проєктуванні нових об'єктів, зокрема в громадському будівництві.

Англомовна література підтверджує ці висновки. Так, Al-Ahmed et al. [7] і Kim et al. [8] вивчали поведінку таких плит за дії згину та зсуву, зафіксувавши збереження структурної стабільності при зменшенні питомої ваги плити. Роботи Smith et al. [9] та Nguyen et al. [10] зосереджуються на оптимізації форми і розташування вставок з метою покращення ресурсоекономічних характеристик конструкцій.

Узагальнення цих досліджень свідчить про перспективність використання пінополістирольних вставок у залізобетонних плитах перекриття [11]. Проте подальші дослідження потребують уточнення впливу геометричних параметрів вставок, типів армування, способів монтажу, а також вивчення довготривалих деформацій і поведінки при повторних навантаженнях.

Метою дослідження є розробка методики оптимізації параметрів полегшеного збірно-монолітного перекриття з полістирольними вставками для досягнення максимальної економічної та технічної ефективності. Завданнями дослідження є: оцінка впливу різних конструктивних варіантів на механічні характеристики перекриття; аналіз споживання матеріалів у різних варіантах конструкції; порівняння економічної ефективності вибраних варіантів; розробка рекомендацій щодо оптимального конструктивного рішення перекриття з використанням полістирольних вставок.

Матеріали та методика дослідження. Для дослідження було використано методику чисельного моделювання конструкцій у програмному забезпеченні ПК Ліра, що дозволяє визначити розподіл моментів, зусиль та деформацій у різних конструкціях перекриттів. Були розглянуті чотири варіанти конструкцій з різними геометричними параметрами, типами армування та товщинами полістирольних вставок. Для кожного варіанту були проведені розрахунки напружено-деформованого стану, а також оцінено споживання матеріалів та витрати на виготовлення кожного варіанту конструктивного рішення перекриття.

Результати досліджень. У рамках дослідження було розглянуто чотири варіанти збірно-монолітного перекриття з полістирольними вставками, які відрізнялись висотою плити, товщиною верхнього шару бетону (так званої «полички») та класом бетону. Для кожної конфігурації було виконано моделювання за допомогою програмного комплексу LIRA-SAPR, із подальшим розрахунком деформацій, армування та обсягів матеріалів [12–13].

Усі варіанти містили порожнини, сформовані за допомогою пінополістирольних блоків,

розміщених у центральній частині перетину перекриття (рис. 1). Змінювались наступні параметри (табл. 1): загальна висота плити: 150 мм, 180 мм; товщина бетонної стільниці: 50 мм, 65 мм; клас бетону: C16/20 та C20/25 [14].

Таблиця 1 – Узагальнюючі показники геометричних характеристик досліджених варіантів перекриттів

Номер варіанту	Товщина плити перекриття H (mm)	Висота полицки плити h (mm)	Клас бетону
Варіант 1	180	65	C20/25
Варіант 2	180	65	C16/20
Варіант 3	150	50	C20/25
Варіант 4	150	50	C16/20

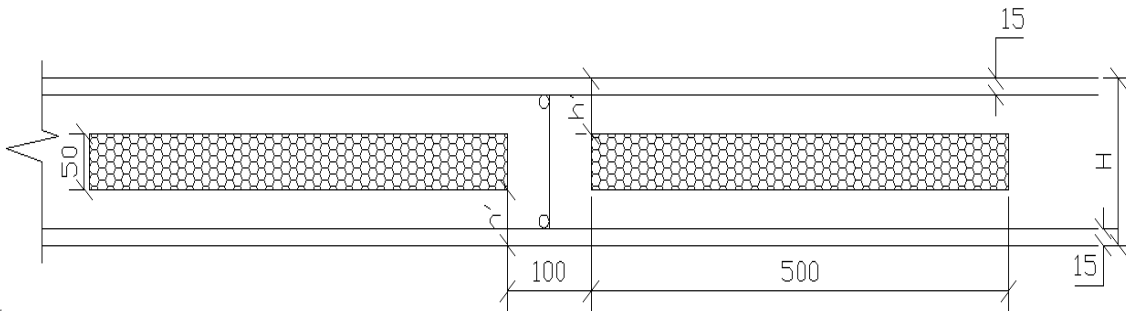


Рис. 1. Поперечний переріз перекриття з полістирольними блоками (H – загальна товщина перекриття, h – висота полицки плити)

Конструкції були змодельовані як тривимірне перекриття, з урахуванням жорсткого з'єднання із контурними балками (рис. 2). У розрахунках враховано власну вагу, експлуатаційні навантаження та нормативні вимоги згідно з ДБН Навантаження та впливи [15].

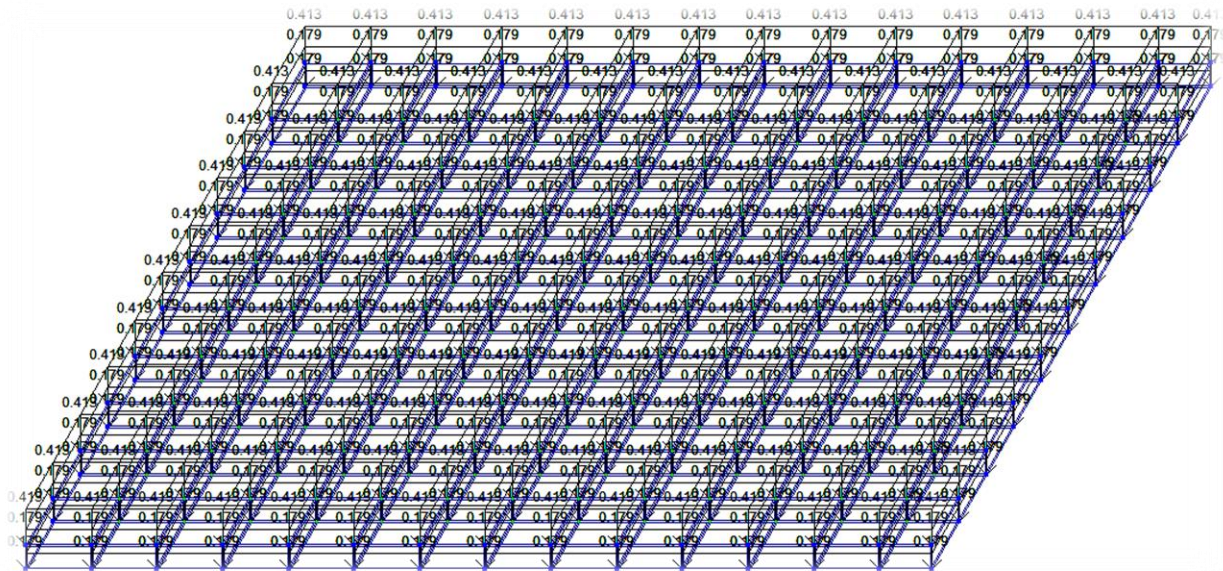


Рис. 2. Розрахункова схема конструкції перекриття з пінополістирольними вставками завантажена власною вагою

Аналіз деформаційних характеристик показав, що всі варіанти перекриття забезпечують нормативні обмеження прогинів та тріщиностійкості. Максимальні вертикальні переміщення не перевищили допустимих значень згідно з нормативними документами [16], навіть для

найтоншого варіанту (Варіант 2, товщина полицки – 50 мм, бетон С16/20).

Слід зазначити, що найменші деформації були зафіксовані у варіанті 1 (висота 180 мм, бетон С20/25) – це пов’язано з підвищеною жорсткістю конструкції. Натомість варіант 3, незважаючи на більшу товщину полицки (65 мм), показав підвищені прогини через застосування менш жорсткого бетону і зменшену загальну висоту (табл. 2).

Таблиця 2 – Узагальнюючі показники геометричних характеристик досліджених варіантів перекриттів

Вид навантаження	Значення деформацій для Варіанта 3 (мм)					
	Вісь X		Вісь Y		Вісь Z	
	min	max	min	max	min	max
Власна вага	0,000754	0,0754	0,0964	0,0968	0	2,53
Постійне	0,0042	0,142	0,00182	0,0182	0	4,75
Тимчасове	0,000398	0,0398	0,00851	0,0511	0	1,33
Повне	0,0053	0,2572	0,10673	0,1661	0	8,61

Розрахункові значення кількості арматури були згруповані в окремі категорії: армування балок, армування бетонної полицки, а також загальні витрати арматури.

Найбільша маса арматури була зафіксована у варіанті 3 – 335,3 кг (рис. 3). Це пояснюється більшою товщиною полицки та необхідністю компенсувати знижену жорсткість за рахунок армування. Для порівняння, найменше значення було у варіанті 2 – 204,9 кг, що демонструє найменшу матеріаломісткість серед армування полицок.

Цікаво, що у варіанті 2, який мав найменше армування балок-стінок, спостерігається збільшена маса арматури полицки – 198,7 кг. Це зумовлено зниженим класом бетону (С16/20) та необхідністю забезпечити тріщиностійкість верхнього шару при зниженій товщині.

Натомість варіант 3, з найбільш армованими балками-стінками, потребував найменшу кількість сталі у полицках – лише 114,6 кг. Це демонструє своєрідну компенсацію між елементами конструкції, коли навантаження перерозподіляється в межах секції.

Об’єднаний аналіз підтвердив, що найбільше загальне армування спостерігалось у варіанті 3 – 450 кг, а найменше – у варіанті 1, де воно становило 381,15 кг. Важливо, що навіть за меншої витрати сталі, варіант 1 залишався найбільш жорстким у плані деформацій, що свідчить про ефективність геометричної форми.

На графіку варіації об’ємів бетону чітко видно, що варіанти з меншою загальною висотою перекриття потребують менше бетону. Варіанти 3 і 4 (висота 150 мм) демонстрували найменше споживання – близько 1,7 м³ на 100 м² плити, у порівнянні з 2,1–2,2 м³ у варіантах 1 та 2.

Цей фактор, у поєднанні з полістирольними порожнинами, суттєво зменшує загальну вагу конструкції, що є перевагою при реконструкціях або будівництві на слабких ґрунтах.

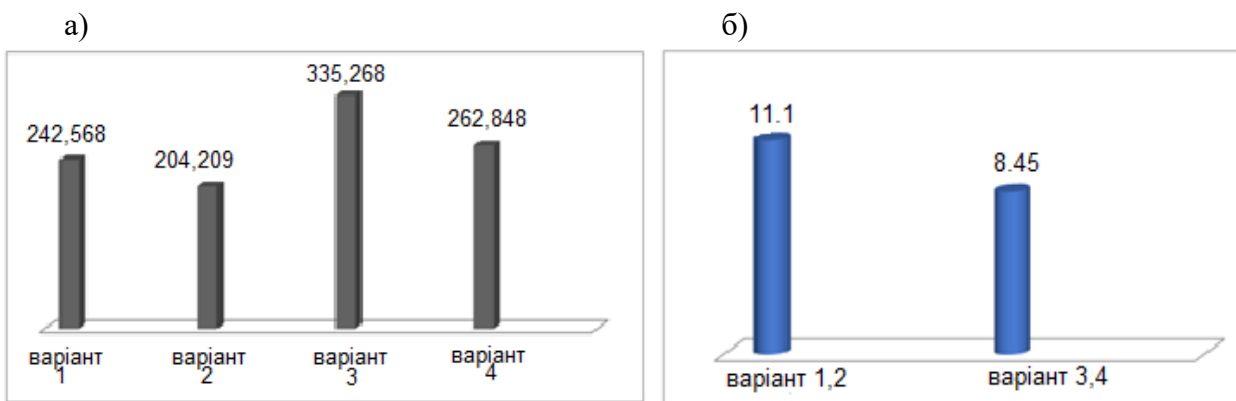


Рис. 3. Витрати матеріалів на улаштування різних варіантів перекриття пінополістирольними вставками:

а – витрати арматури, кг; б – витрати бетону, м³

Фінансові розрахунки виконувались на основі цін, наведених у другому розділі дослідження (табл. 3). Було визначено витрати на арматуру та бетон для кожного варіанту, з подальшим розрахунком повної вартості перекриття на 1 м².

Найвища вартість арматури були у варіанті 2 (близько 409,2 грн), а найнижчі – у варіанті 1 (346,7 грн). Водночас варіант 2 компенсував це меншою витратою бетону.

Найдешевшим варіантом виявився варіант 4 (1078,46 грн/м²), тоді як найдорожчим – варіант 1 (1293,0 грн/м²). Варіанти 2 та 3 мали проміжні значення – 1129,6 та 1249,8 грн відповідно. Таким чином, вартісна різниця між найдешевшою і найдорожчою конструкцією склала 16,6 %.

Таблиця 3 – Техніко-економічне порівняння варіантів перекриття на 1м²

Характеристики	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
Клас бетону	C20/25		C16/20	
Висота полочки плити, мм	65	50	65	50
Витрати арматури, кг/м ²	10,84	12,79	11,45	11,21
Витрати бетону, м ³ /м ²	0,315	0,24	0,315	0,24
Вартість арматури (грн)	346,7	409,2	366,6	358,06
Вартість бетону (грн)	946,3	720,4	883,2	720,4
Загальна вартість (тис. грн)	1293,0	1129,6	1249,8	1078,46

На основі об'єднаного техніко-економічного аналізу встановлено, що варіант 4 є найбільш оптимальним. Він демонструє задовільну деформаційну поведінку, помірне споживання матеріалів та найменшу вартість. Це свідчить про доцільність застосування таких рішень у практичному будівництві.

Варіант 1, хоча й характеризується високою жорсткістю, не може вважатися економічно доцільним, зважаючи на значну витрату матеріалів та загальну вартість. Варіанти 2 і 3 можуть застосовуватись за специфічних умов — наприклад, коли важлива мінімальна маса або коли потрібна підвищена тріщиностійкість верхнього шару.

Висновки. Усі розглянуті варіанти задовольняють нормативні вимоги за несучою здатністю та деформативністю. Використання пінополістирольних вставок дозволяє суттєво знизити витрати матеріалів. Оптимальним з техніко-економічної точки зору є варіант із загальною висотою перекриття 150 мм, товщиною бетонної полочки 65 мм та бетоном класу C20/25. Отримані результати підтверджують ефективність поєднання комп'ютерного моделювання та порівняльного аналізу для вибору конструктивних рішень. Для подальших досліджень варто зосередитись на детальному аналізі довговічності таких конструкцій, а також вивчити вплив різних типів армування на міцність і зносостійкість перекриттів.

Література

1. Мельник І.В., Сорохтей В.М., Кузик О.О. Монолітні плоскі залізобетонні перекриття з пінополістирольними вставками. *Вісник Львівського територіального відділення Академії будівництва України*. 2010. № 5/10. С. 146–153.
2. Мельник І.В., Сорохтей В.М., Приставський Т.В. Деформативність фрагментів монолітного залізобетонного плоского перекриття з поздовжнім і поперечним розташуванням прямокутних вставок. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2012. Вип. 23. С. 312–320.
3. Литвиняк О.Я. Міцність і деформативність збірно-монолітних залізобетонних плит перекриття з використанням пінобетону. дис. на здобуття наук ступеня канд. техн наук. 05.23.01 / Національний університет "Львівська політехніка". Львів, 2015. 197 с.

4. Буцька О.Л., Зезюков Д.М., Махінко М.М., Котов М.А. Щодо визначення фактичного напруженого стану елементів плоских збірно-монолітних перекриттів. *Вісник Придніпровської державної академії*. 2019. №2. С. 24–29.
5. Бондар А.В., Загіка В.М. Сучасні технології збірно-монолітних перекриттів для реконструкції громадських будівель. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2020. № 2. С. 35–44.
6. Буцька О.Л., Зезюков Д.М., Махінко М.М., Зінкевич О.Г. Обґрунтування оптимального виду пустотоутворювача в монолітному плоскому перекритті. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 3. С. 3–18.
7. Al-Ahmed A.H.A., Ibrahim F.H., Allawi A.A., El-Zohairy A. Behavior of One-Way Reinforced Concrete Slabs with Polystyrene Embedded Arched Blocks. *Buildings. MDPI*. 2022. 12(3). pp 331–339. <https://doi.org/10.3390/buildings12030331>
8. Kim S., Lee S., Park J. Structural Performance of Shear Loaded Precast EPS-Foam Concrete Half-Shaped Slabs. *Sustainability, MDPI*. 2020. 12(22)-9679. <https://doi.org/10.3390/su12229679>
9. Smith J., Johnson L., Wang X. Experimental Study on Reinforced Concrete Slabs with EPS Inserts under Flexural Loads. *Construction and Building Materials*. 2020. №230(117024) pp 132–145.
10. Nguyen T., Tran D., Le H. Optimization of Polystyrene-Concrete Composite Slabs for Sustainable Construction. *Journal of Cleaner Production*. 2021. №278 (123456).
11. Ahmed S., Khan M., Ali R. Mechanical Properties of Lightweight Concrete with Polystyrene Beads. *Materials Today: Proceedings*. 2019. №17. pp. 123–130.
12. Основи комп'ютерного моделювання: навч. посібник. / М.С. Барабаш та ін. 2-е вид. стер. К.: НАУ., 2019. 492 с.
13. Комп'ютерні технології проектування залізобетонних конструкцій: навч. посібник. / Ю.В. Веружський та ін. К.: Книжкове вид-во НАУ., 2006. 808 с.
14. ДСТУ Б EN 1992-1-1:2010. Єврокод 2: Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд. Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. [Чинний від 2013-07-01]. К.: Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2012. 312 с.
15. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. [Чинний від 2007-10-01]. Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України. Київ. 2009. 97 с.
16. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. [Чинний від 2007-01-01]. К.: Мінбуд України, 2006. 15 с.

References

- [1] I.V. Melnyk, V.M. Sorokhetei, O.O. Kuzyk, "Monolitni ploski zalizobetonni perekryttia z pinopolistyrolnomy vstavkamy", *Visnyk Lvivskoho terytorialnoho viddilennia Akademii budivnytstva Ukrainy*, vol. 5/10, pp. 146–153, 2010.
- [2] I.V. Melnyk, V.M. Sorokhetei, T.V. Prystavskiyi, "Deformatyvni fragmenty monolitnoho zalizobetonnoho ploskoho perekryttia z pozdovzhnim i poperechnym rozdashuvanniam priamokutnykh vstavok", *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy*, vol. 23, pp. 312–320, 2012.
- [3] O.Ya. Lytvyniak, "Mitsnist i deformatyvni zbirno-monolitnykh zalizobetonnykh plyt perekryttia z vykorystanniam pinobetonu", dys. na zdobuttia nauk stupenia kand. tekhn nauk. 05.23.01, Natsionalnyi universytet "Lvivska politekhnika". Lviv, 2015.
- [4] O.L. Butska, D.M. Zeziukov, M.M. Makhinko, M.A. Kotov, "Shchodo vyznachennia faktychnoho napruzhеного стану elementiv ploskykh zbirno-monolitnykh perekryttiv", *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii*, vol. 2, pp.24–29, 2019.
- [5] A.V. Bondar, V.M. Zahika, "Suchasni tekhnolohii zbirno-monolitnykh perekryttiv dlia rekonstruksii hromadskykh budivel", *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruksii v budivnytstvi*, vol. 2, pp. 35–44, 2020.

- [6] O.L. Butska, D.M. Zeziukov, M.M. Makhinko, O.H. Zinkevych, "Obgruntuvannia optymalnoho vydu pustotoutvoriuvacha v monolitnomu ploskomu perekrytti", *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, vol. 3, pp. 3–18, 2019.
- [7] A.H.A. Al-Ahmed, F.H. Ibrahim, A.A. Allawi, A. El-Zohairy, "Behavior of One-Way Reinforced Concrete Slabs with Polystyrene Embedded Arched Blocks. Buildings", *MDPI*, vol. 12(3), pp. 331–339, 2022. <https://doi.org/10.3390/buildings12030331>.
- [8] S. Kim, S. Lee, J. Park, "Structural Performance of Shear Loaded Precast EPS-Foam Concrete Half-Shaped Slabs. Sustainability", *MDPI*, vol. 12(22)-9679, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12229679>.
- [9] J. Smith, L. Johnson, X. Wan, "Experimental Study on Reinforced Concrete Slabs with EPS Inserts under Flexural Loads", *Construction and Building Materials*, vol. 230(117024), pp. 132–145, 2020.
- [10] T. Nguyen, D. Tran, H. Le, "Optimization of Polystyrene-Concrete Composite Slabs for Sustainable Construction", *Journal of Cleaner Production*, vol. 278 (123456), pp. 213–225, 2021.
- [11] S. Ahmed, M. Khan, R. Ali, "Mechanical Properties of Lightweight Concrete with Polystyrene Beads", *Materials Today: Proceedings*, vol. 17, pp. 123–130, 2019.
- [12] M.S. Barabash ta in., *Osnovy kompiuternoho modeliuвання: navch. Posibnyk. 2-e vyd. ster.* Kyiv: NAU., 2019.
- [13] Yu.V. Veriuzhskyyi ta in., *Kompiuterni tekhnologii proektuvannia zalizobetonnykh konstruksii: navch. posibnyk.* Kyiv: Knyzhkove vyd-vo NAU., 2006.
- [14] DSTU B EN 1992-1-1:2010. Yevrokod 2: Proektuvannia zalizobetonnykh konstruksii. Chastyna 1-1. Zahalni pravyla i pravyla dlia sporud. Ministerstvo rehionalnoho rozvytku ta budivnytstva Ukrainy. K.: Derzhavne pidpriumstvo «Ukrarkhbudininform», 2012.
- [15] DNB V.1.2-2:2006. Navantazhennia i vplyvy. Ministerstvo budivnytstva, arkhitektury ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. Kyiv. 2009.
- [16] DSTU B V.1.2-3:2006. Prohyny i peremishchennia. Vymohy proektuvannia.. Kyiv: Minbud Ukrainy, 2006.

OPTIMIZATION OF LIGHTWEIGHT PRECAST-MONOLITHIC SLABS WITH POLYSTYRENE VOID FORMERS

¹**Butska O.**, PhD., Assistant Professor,

butska.olena@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4377-3746

¹**Makhinko M.**, PhD., Assistant Professor,

makhinko.mykola@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5541-8672

¹**Zeziukov D.**, PhD, Assistant Professor,

denis.zeziukov@pdaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7451-992X

¹*Educational and Scientific Institute "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture" of the Ukrainian State University of Science and Technology*
24a, Architect Oleh Petrov Street, Dnipro, 49600, Ukraine

Abstract. This article is dedicated to the optimization of parameters of lightweight precast-monolithic slabs incorporating polystyrene void formers, which represent one of the promising structural solutions in modern construction. The use of polystyrene inserts allows for a significant reduction in the self-weight of the slab and a decrease in material consumption, making this technology especially relevant under current construction conditions. However, in order to achieve optimal technical and economic performance, it is necessary to properly select the design parameters, particularly the characteristics of the inserts, the type of reinforcement, and the geometric properties of the slab. The purpose of the study is to optimize these parameters to achieve the best possible combination of cost-effectiveness, structural strength, and deformation performance.

As part of the research, several design alternatives incorporating polystyrene inserts of various thicknesses and reinforcement types were analyzed. Mathematical modeling methods were applied using the LIRA software package. Based on the performed calculations, it was determined that slab configurations with polystyrene inserts ranging from 150 mm to 180 mm in thickness demonstrate the most favorable balance between economic efficiency and structural performance. These options significantly reduce the consumption of materials (concrete and reinforcement) without compromising the strength and reliability of the floor system.

One of the key findings is the identification of optimal reinforcement layouts for each of the analyzed slab configurations, which allows reducing of reinforcement costs while maintaining structural strength. The study also revealed that increasing the thickness of polystyrene inserts beyond a certain threshold leads to a rise in overall construction cost, which is not justified from an economic efficiency standpoint.

Based on the obtained results, it can be concluded that lightweight precast-monolithic slabs with polystyrene inserts represent an efficient and economically advantageous solution for modern construction, provided that the structural parameters are properly selected. However, to achieve maximum effectiveness, it is necessary to take into account not only the mechanical properties but also the economic and technological factors that influence the design and construction processes. Future research should focus on investigating the durability of such structures under various operating conditions, as well as on optimizing the installation process to reduce labor costs and increase construction speed.

Keywords: precast-monolithic slab, lightweight reinforced concrete slab, polystyrene inserts, slab structure optimization.

Стаття надійшла до редакції 9.05.2025

[This work](#) © 2025 by [Butska O.](#), [Makhinko M.](#), [Zezyukov D.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

**РОЗРАХУНОК НА ВІЛЬНІ ОСЕСИМЕТРИЧНІ КОЛИВАННЯ КРУГЛИХ ПЛАСТИН,
ЩО ОПИРАЮТЬСЯ НА СТЕПЕНЕВО-ЗМІННУ ПРУЖНУ ОСНОВУ ВІНКЛЕРА**

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

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

¹**Величко Д.В.**, аспірант,
velychko.engineer@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7837-872X

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

Анотація. Дана публікація присвячена подальшому розвитку аналітичних методів розрахунку на вільні коливання круглих пластин, що опираються на неоднорідну суцільну пружну основу Вінклера. Неоднорідність пружної основи задається змінним коефіцієнтом постелі. Розглядається випадок, коли коефіцієнт постелі є степеневою функцією. В явній формі виписані фундаментальні функції відповідного рівняння коливань для круглих суцільних пластин. Дані функції є безрозмірними та представляються абсолютно і рівномірно збіжними подвійними степеневими рядами. В свою чергу, через вказані функції виражаються формули для динамічних параметрів стану пластини – прогину, кута повороту, радіального і окружного згинальних моментів та поперечної сили. Отримано аналітичне подання для частоти вільних коливань пластини, що встановлює її залежність від безрозмірної частоти та інших механічних параметрів системи. В свою чергу безрозмірна частота визначається з частотних рівнянь, до яких приходимо після реалізації заданих граничних умов.

На прикладі продемонстровано практичне застосування отриманих розв'язків. Розглянуто бетонну плиту з жорстко закріпленим контуром, що опирається на степенево-змінну пружну основу. Авторським методом (АМ) обчислені перші п'ять частот осесиметричних коливань. Також в графічному форматі представлені відповідні перші п'ять форм коливань. Отримані АМ 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 розрахунків, отриманих за допомогою різного роду наближених методів. З метою такого порівняння, в роботі надано результати розрахунку, що отримані методом скінченних елементів (МСЕ). Визначено відносну похибку МСЕ при розрахунку даної конструкції.

Ключові слова: кругла пластина, неоднорідна основа, гіпотеза Вінклера, змінний коефіцієнт постелі, осесиметричні коливання, аналітичний розв'язок.

Вступ. Круглі пластини на суцільній пружній основі становлять окремий тип конструкцій, що широко використовуються в інженерній практиці. Їх застосування охоплює низку галузей, серед яких – промислове та цивільне будівництво, транспортна інфраструктура, гідротехнічне та аерокосмічне машинобудування, кораблебудування тощо. У будівництві особливо поширені інженерні споруди з круговою формою в плані: телевізійні вежі, вентиляційні й димові труби, опори вітроенергетичних установок, башти радіорелейного зв'язку та інші. Для таких конструкцій характерне використання фундаментів у вигляді кільцевих пластин, що працюють у контакті з основою.

Одним з найпоширеніших підходів до моделювання взаємодії конструкції з ґрунтовою основою є модель Вінклера, яка розглядає основу як сукупність незалежних вертикальних пружин, що чинять опір переміщенням конструкції. У рамках цієї моделі основа характеризується коефіцієнтом постелі – єдиним параметром, що описує її жорсткість. У найпростішому випадку передбачається, що основа є однорідною, а коефіцієнт постелі –

сталим, що суттєво спрощує математичний опис і дає змогу отримувати аналітичні розв'язки. Проте на практиці така ідеалізація рідко відповідає дійсності. Для отримання точніших результатів доцільно враховувати неоднорідність основи, при якій коефіцієнт постелі є функцією координат [1].

Дана стаття присвячена розрахунку на вільні коливання круглих суцільних пластин, коли коефіцієнт постелі, який характеризує неоднорідність основи, є степеневою функцією.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Теорія розрахунку круглих пластин докладно розглядається в працях [2-4] та багатьох інших. Щодо аналітичних розрахунків круглих пластин, що лежать на пружній основі Вінклера зі змінним коефіцієнтом постелі, то вони зустрічаються в науковій періодиці вкрай рідко [1, 5-6]. У публікаціях [5-6] запропоновано аналітичний метод розрахунку осесиметричного згину круглих та кільцевих пластин, що спирається на модель Вінклера зі змінним коефіцієнтом постелі. Метод включає розв'язання відповідного диференціального рівняння зі змінними коефіцієнтами, що дозволяє отримати точні аналітичні вирази для прогинів та внутрішніх зусиль при довільних граничних умовах і навантаженнях. Це дає змогу застосовувати метод для різних типів пластин та навантажень, що робить його корисним для практичних розрахунків.

Детальний огляд робіт, присвячених дослідженню коливань круглих пластин на змінній пружній основі, надано в [1]. Після ретельного аналізу автори [1] констатують, що пошук аналітичних розв'язків є актуальним.

У публікації [7] за допомогою лінійного аналізу та методу Релея-Шмідта розв'язано основну задачу та наведено частотні коефіцієнти, що відповідають нижчим симетричним та несиметричним формам поперечних коливань, за умови, що тонка ізотропна пластина пружно утримується від переміщення та обертання. У статті [8] представлено узагальнений чисельний метод, що ґрунтується на відомому методі Мора. Зокрема, метод адаптовано для випадку змінної одно параметричної пружної основи. Важливо зауважити, що він був реалізований для комп'ютерного застосування. У роботі [9] для визначення найменшої власної частоти поперечних коливань жорстко закріплених та підпертих круглих пластин застосовано варіаційний метод Релея-Рітца. При цьому координатні функції є комбінацією поліномів, які задовольняють граничні умови на зовнішній границі, та тригонометричних виразів. Автори [10] за допомогою аналітичного методу отримали частотне рівняння кругової пластини з пружними крайовими опорами, частина якої опирається на несучільну пружну основу, провели параметричні дослідження поведінки кругових пластин з пружною крайовою опорою при різних значеннях параметра поперечної жорсткості, параметра основи для різних граничних умов. У [11] представлено чисельну процедуру методу скінченних елементів для нелінійного динамічного аналізу круглих залізобетонних плитних конструкцій, що піддаються змінному динамічному навантаженню. При цьому використовуються вироджені елементи з вісьмома вузлами. У статті [12] досліджено вільні коливання та проведено модальний аналіз тонких круглих пластин з довільними крайовими умовами, що лежать на пружній основі. Для моделювання пружної основи використовуються параметри Пастернака та Вінклера. Отримано значення власних частот та форм коливань круглих пластин з використанням чисельного методу розв'язання диференціальних рівнянь. При цьому враховано вплив параметрів жорсткості основи та крайових умов на власні частоти та форми коливань. Роботи [13, 14] присвячено дослідженню коливань круглих пластин при нестандартних граничних умовах. У роботі [13] представлено дослідження коливальних характеристик тонких круглих пластин на однорідній основі Вінклера зі спеціальним пружним затисненням на кромці. Аналітичним методом отримано частотне рівняння. Проведено параметричні дослідження коливань круглих пластин, при різних параметрах жорсткості пружного затиснення на контурі. У [14] розглянуто ситуацію, коли граничні умови пластини відхиляються від класичних випадків. Досліджено поперечні коливання тонких круглих пластин на однорідній основі Вінклера з пружною опорою по контуру. У статті [15] представлено дослідження динаміки тонких круглих пластин, закріплених по контуру та проведено скінченно-елементний аналіз. Аналізуючи динамічну поведінку пластини, визначено форми коливань, які можуть бути використані для виявлення закономірностей, що

характеризують місце пошкодження. У [16] та [17] на основі класичної теорії пластин побудовано точні розв'язки для характеристик вільних коливань тонких круглих пластин, пружно обмежених від переміщень, які спираються на пружну основу типу Вінклера. Проведено параметричні дослідження для оцінки впливу крайового підкріплення та жорсткості пружної основи на власні частоти круглих пластин. Розрахунки проведено для власних частот коливань для різних значень параметра жорсткості основи типу Вінклера. Дослідження [18] та [19] зосереджені на застосуванні методу двовимірного диференціального перетворення для вивчення динамічної реакції функціонально неоднорідних круглих пластин, що спираються на пружну основу, що характеризується двома параметрами. У роботі [20] розглянуто аналіз вільних коливань круглих пластин, що спираються на основи Вінклера і Пастернака. Основне диференціальне рівняння в частинних похідних розв'язується за допомогою методу Гальоркіна. Визначено поверхневі радіальні та окружні напруження. Отримані аналітичні розв'язки використано для дослідження впливу пружних основ на динамічну поведінку круглої пластини, впливу радіальних та окружних напружень на форми коливань круглої пластини. У статті [21] досліджено динамічну поведінку нелінійних вільних коливань круглої пластини, що спирається на двопараметричну основу. Розв'язок диференціального рівняння отримано аналітично з використанням перетворення Лапласа. Аналітичні розв'язки використано для визначення впливу пружної основи, радіальних та окружних напружень на власну частоту пластини, та визначено радіальні та колові напруження.

Отже, як показує аналіз публікацій, автори здебільшого використовують різного роду наближені методи. В науковій періодиці відсутні дослідження коливань круглих пластин на неоднорідній пружній основі, які базуються на точному розв'язку диференціального рівняння. Тому розробка саме таких аналітичних методів розрахунку круглих пластин є актуальною. Дана стаття присвячена випадку, коли неоднорідність основи задається степеневою функцією.

Мета та завдання. Мета роботи – подальший розвиток аналітичних методів розрахунку на вільні коливання круглих пластин на неоднорідній пружній основі.

Завдання роботи:

- отримати аналітичний розв'язок задачі про осесиметричні коливання круглих суцільних пластин, що опираються на суцільну пружну основу Вінклера зі степенево-змінним коефіцієнтом постелі;
- проілюструвати на прикладі застосування отриманих розв'язків, виконавши аналітичний розрахунок бетонної плити АМ та МСЕ;
- визначити похибку МСЕ при розрахунку даної конструкції.

Матеріали та методика дослідження. Методика досліджень ґрунтується на точному розв'язку диференціального рівняння коливань пластини та розробленим способом його чисельної реалізації. Для побудови точного розв'язку в цій публікації використовується метод прямого інтегрування, розвинений у роботі [22]. При розробці авторської методики використовувались теорія функціональних рядів та теорія диференціальних рівнянь в частинних похідних.

Результати досліджень. Об'єктом дослідження є кругла суцільна пластина сталої циліндричної жорсткості D , що опирається на неоднорідну суцільну пружну основу Вінклера та знаходиться під впливом змінного неперервно-розподіленого поперечного навантаження (рис. 1). Тут a – радіус пластини, r – радіальна координата ($0 \leq r \leq a$).

Вільні осесиметричні коливання пластини виникають, коли сила реакції пружної основи $R(r, t)$ і умови закріплення країв не залежать від полярного кута θ . Під час таких коливань у пластині діють тільки три динамічні внутрішні зусилля, а саме, радіальний і окружний згинальні моменти $M_r(r, t)$, $M_\theta(r, t)$, а також радіальна поперечна сила $Q_r(r, t)$ (рис. 2). Крутильний момент $M_{r\theta}(r, t)$ і окружна поперечна сила $Q_\theta(r, t)$ дорівнюють нулю завдяки осьовій симетрії коливань.

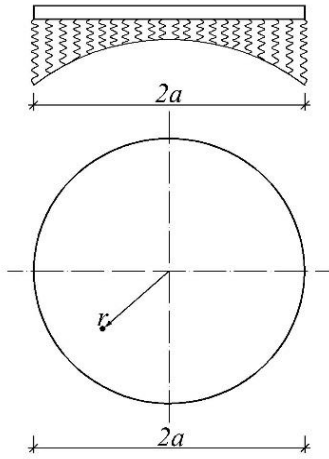


Рис. 1. Кругла пластина на змінній пружній основі

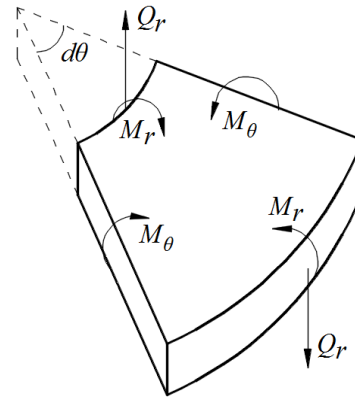


Рис. 2. Згинальні моменти та поперечна сила в пластині

Згідно з гіпотезою Вінклера реакція основи $R(r,t)$ на пластину і динамічний прогин пластини $W(r,t)$ пов'язані між собою рівністю:

$$R(r,t) = -k(r)W(r,t),$$

де $k(r)$ – змінний коефіцієнт постелі. Відносно $k(r)$ приймаємо форму запису $k(r) = k_0 B(r)$, де k_0 – значення коефіцієнта постелі в деякій характерній точці пластини; $B(r)$ – безрозмірна безперервна функція, що виражає закон зміни коефіцієнта постелі від радіальної координати.

Дана робота присвячена випадку, коли коефіцієнт постелі задається степеневою функцією:

$$k(r) = k(a) \left(\frac{r}{a} \right)^s, \quad s \geq 0,$$

тобто тут

$$k_0 = k(a), \quad B(r) = \left(\frac{r}{a} \right)^s.$$

Диференціальне рівняння коливань у нашому випадку має вигляд [2-4]:

$$D \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial W}{\partial r} \right) \right] \right\} + k_0 \left(\frac{r}{a} \right)^s W + \rho h \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

де ρ – щільність матеріалу, h – товщина пластини. Знаходження точного розв'язку даного рівняння є центральною проблемою дослідження.

Застосовуючи метод Фур'є, розв'язок (1) шукаємо у вигляді:

$$W(r,t) = w(r)T(t), \quad (2)$$

де $w(r)$ – амплітудна функція прогинів, що залежить тільки від координати r , $T(t)$ – функція часу. Підставивши (2) у рівняння (1) та розподіливши змінні, отримаємо два звичайні диференціальні рівняння:

$$T(t) + \omega^2 T(t) = 0; \quad (3)$$

$$D \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] \right\} + \left(k_0 \left(\frac{r}{a} \right)^s - \rho h \omega^2 \right) w = 0, \quad (4)$$

де ω^2 – константа методу Фур'є.

Розв'язок рівняння (3) очевидний:

$$T(t) = T(0) \cos \omega t + \frac{T'(0)}{\omega} \sin \omega t,$$

де $T(0)$, $\dot{T}(0)$ – параметри початкових умов руху. З цього розв’язку впливає, що введена стала величина ω є частотою вільних коливань пластини.

Головна форма коливань визначається як розв’язок рівняння (4), яке перепишемо у вигляді:

$$\Delta\Delta w + \frac{1}{a^4} \left(K \left(\frac{r}{a} \right)^s - \Omega^2 \right) w = 0, \quad (5)$$

де $\Delta = d^2/dr^2 + 1/r d/dr$ – оператор Лапласа; $K = a^4 k_0 / D$ – відомий безрозмірний параметр; Ω – безрозмірна частота, яка пов’язана з частотою ω рівністю:

$$\Omega^2 = \frac{a^4 \rho h \omega^2}{D}. \quad (6)$$

Позначимо через $X_n(r)$, $Y_n(r)$ ($n=1,2$) шукані фундаментальні розв’язки рівняння (5), причому для $Y_n(r)$ приймемо подання:

$$Y_n(r) = X_n(r) \ln \frac{r}{a} + Z_n(r) \quad (n=1,2), \quad (7)$$

де $Z_n(r)$ – допоміжні невідомі функції. Підставляючи (7) у рівняння (5), після перетворень отримаємо:

$$\begin{aligned} & \left(\Delta\Delta X_n(r) + \frac{1}{a^4} \left(K \left(\frac{r}{a} \right)^s - \Omega^2 \right) X_n(r) \right) \ln \frac{r}{a} + \\ & + \Delta\Delta Z_n(r) + \frac{1}{a^4} \left(K \left(\frac{r}{a} \right)^s - \Omega^2 \right) Z_n(r) + \frac{4}{r} \frac{d^3 X_n(r)}{dr^3} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Оскільки за умовою $X_n(r)$ ($n=1,2$) – розв’язки рівняння (5), то вираз при логарифмі в (8) повинен тотожно дорівнювати нулю. Отже, замість рівності (8) можемо записати:

$$\Delta\Delta X_n(r) + \frac{1}{a^4} \left(K \left(\frac{r}{a} \right)^s - \Omega^2 \right) X_n(r) = 0 \quad (n=1,2); \quad (9)$$

$$\Delta\Delta Z_n(r) + \frac{1}{a^4} \left(K \left(\frac{r}{a} \right)^s - \Omega^2 \right) Z_n(r) = -\frac{4}{r} \frac{d^3 X_n(r)}{dr^3} \quad (n=1,2). \quad (10)$$

Після визначення з рівнянь (9), (10) фундаментальних $X_n(r)$ ($n=1,2$) та допоміжних $Z_n(r)$ ($n=1,2$) функцій, загальний інтеграл диференціального рівняння (5) запишеться у вигляді:

$$w(r) = C_1 X_1(r) + C_2 X_2(r) + C_3 Y_1(r) + C_4 Y_2(r), \quad (11)$$

де C_1, C_2, C_3, C_4 – довільні константи, що мають розмірність прогину.

Загалом формула (11) буде придатна для дослідження коливань суцільних та кільцевих пластин. Однак дане дослідження присвячено саме суцільним пластинам, тому із умови скінченності прогину в центрі пластини $r=0$, знаходимо $C_3 = C_4 = 0$. В такому разі замість формули (11) матимемо:

$$w(r) = C_1 X_1(r) + C_2 X_2(r). \quad (12)$$

Отже, у даному випадку слід визначити тільки дві фундаментальні функції $X_n(r)$ ($n=1,2$), а знаходити $Z_n(r)$ ($n=1,2$) немає потреби.

Розв’язки рівнянь (9) шукатимемо у вигляді:

$$X_n(r) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} (-K)^k \Omega^{2m} \alpha_{n,m,k}(r), \quad (13)$$

де $\alpha_{n,m,k}(r)$ ($n = 1, 2$) – невідомі функції, які вважаємо неперервними разом зі своїми похідними від першого до четвертого порядку. Поки що припускаємо, що ряди (13), а також аналогічні ряди, складені з перших чотирьох похідних функцій $\alpha_{n,m,k}(r)$ ($n = 1, 2$), рівномірно збігаються. У такому разі буде можлива операція диференціювання рядів.

Підставляючи (13) у рівняння (9), матимемо:

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} (-K)^k \Omega^{2m} \Delta \Delta \alpha_{n,m,k}(r) - \frac{1}{a^4} \left(\frac{r}{a}\right)^s \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} (-K)^{k+1} \Omega^{2m} \alpha_{n,m,k}(r) - \frac{1}{a^4} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} (-K)^k \Omega^{2m+2} \alpha_{n,m,k}(r) = 0.$$

У другій сумі зсунемо індекс k на одиницю, тобто замінимо k на $k-1$. Таку ж саму операцію виконаємо в третій сумі з індексом m . У підсумку отримаємо:

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} (-K)^k \Omega^{2m} \Delta \Delta \alpha_{n,m,k}(r) - \frac{1}{a^4} \left(\frac{r}{a}\right)^s \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} (-K)^k \Omega^{2m} \alpha_{n,m,k-1}(r) - \frac{1}{a^4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} (-K)^k \Omega^{2m} \alpha_{n,m-1,k}(r) = 0.$$

Далі, після перетворень приходимо до необхідності виконання тотожності:

$$\Delta \Delta \alpha_{n,0,0}(r) + \sum_{k=1}^{\infty} (-K)^k \left(\Delta \Delta \alpha_{n,0,k}(r) - \frac{1}{a^4} \left(\frac{r}{a}\right)^s \alpha_{n,0,k-1}(r) \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \Omega^{2m} \left(\Delta \Delta \alpha_{n,m,0}(r) - \frac{1}{a^4} \alpha_{n,m-1,0}(r) \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} (-K)^k \Omega^{2m} \left(\Delta \Delta \alpha_{n,m,k}(r) - \frac{1}{a^4} \left(\frac{r}{a}\right)^s \alpha_{n,m,k-1}(r) - \frac{1}{a^4} \alpha_{n,m-1,k}(r) \right) = 0.$$

Щоби задовольнити дану тотожність, прирівняємо до нуля всі змінні коефіцієнти при степенях $(-K)^k \Omega^{2m}$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) ($k = 0, 1, 2, \dots$). При цьому в отриманих рівняннях перейдемо від операторної до явної форми запису. У підсумку для визначення початкових та твірних функцій матимемо диференціальні рівняння:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\alpha_{n,0,0}(r)}{dr} \right) \right] \right\} = 0 \quad (n = 1, 2); \tag{14}$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\alpha_{n,m,0}(r)}{dr} \right) \right] \right\} = \frac{1}{a^4} \alpha_{n,m-1,0}(r) \quad (m = 1, 2, 3, \dots); \tag{15}$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\alpha_{n,0,k}(r)}{dr} \right) \right] \right\} = \frac{1}{a^4} \left(\frac{r}{a}\right)^s \alpha_{n,0,k-1}(r) \quad (k = 1, 2, 3, \dots); \tag{16}$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\alpha_{n,m,k}(r)}{dr} \right) \right] \right\} = \frac{1}{a^4} \left(\frac{r}{a}\right)^s \alpha_{n,m,k-1}(r) + \frac{1}{a^4} \alpha_{n,m-1,k}(r) \tag{17}$$

$$(m = 1, 2, 3, \dots) (k = 1, 2, 3, \dots).$$

В якості $\alpha_{n,0,0}(r)$ ($n = 1, 2$) виберемо такі функції:

$$\alpha_{n,0,0}(r) = \left(\frac{r}{a}\right)^{2n-2} \quad (n = 1, 2). \tag{18}$$

Очевидно, що кожна з них задовольняє рівнянню (14). Далі, інтегруючи рівняння (15)-(17) і вважаючи при цьому сталі інтегрування рівними нулю, отримаємо:

$$\alpha_{n,m,0}(r) = \frac{1}{a^4} \int_0^r \int_0^r \int_0^r \int_0^r r \alpha_{n,m-1,0}(r) dr dr dr dr \quad (m = 1, 2, 3, \dots); \tag{19}$$

$$\alpha_{n,0,k}(r) = \frac{1}{a^4} \int_0^r \frac{1}{r_0} \int_0^r \frac{1}{r_0} \int_0^r \frac{1}{r_0} \int_0^r r \left(\frac{r}{a}\right)^s \alpha_{n,0,k-1}(r) dr dr dr dr \quad (k = 1, 2, 3, \dots); \quad (20)$$

$$\alpha_{n,m,k}(r) = \frac{1}{a^4} \int_0^r \frac{1}{r_0} \int_0^r \frac{1}{r_0} \int_0^r \frac{1}{r_0} \int_0^r r \left(\left(\frac{r}{a}\right)^s \alpha_{n,m,k-1}(r) + \alpha_{n,m-1,k}(r)\right) dr dr dr dr \quad (21)$$

$(m = 1, 2, 3, \dots) (k = 1, 2, 3, \dots).$

Як видно, формули (19)-(21) є рекурентними. За допомогою цих формул по відомій початковій функції $\alpha_{n,0,0}(r)$ послідовно визначаються функції $\alpha_{n,m,0}(r)$, $\alpha_{n,0,k}(r)$, $\alpha_{n,m,k}(r)$, які називатимемо твірними [22]. Для таких функцій рівняння (9) задовольняється тотожно за побудовою.

Запишемо твірні функції у явному аналітичному вигляді, розв'язавши рекурентні співвідношення (19)-(21). Послідовно інтегруючи по формулам (19), (20) з урахуванням (18), знаходимо:

$$\alpha_{n,m,0}(r) = \frac{1}{(2^{2m}(n+2m-1)!)^2} \left(\frac{r}{a}\right)^{2n+4m-2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots); \quad (22)$$

$$\alpha_{n,0,k}(r) = \frac{1}{(p_{n,0,1,s} p_{n,0,2,s} \dots p_{n,0,k,s})^2} \left(\frac{r}{a}\right)^{2n+k(s+4)-2} \quad (k = 1, 2, 3, \dots), \quad (23)$$

де

$$p_{n,0,k,s} = (2n+k(s+4)-4)(2n+k(s+4)-2) \quad (k = 1, 2, 3, \dots).$$

Розв'язок (21) шукатимемо у вигляді:

$$\alpha_{n,m,k}(r) = c_{n,m,k,s} \left(\frac{r}{a}\right)^{2n+4(m+k)+ks-2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (24)$$

де $c_{n,m,k,s}$ – безрозмірні коефіцієнти, що підлягають визначенню. При цьому, в трьох окремих випадках $m = 0, k = 0$; $k = 0, m = 1, 2, 3, \dots$; $m = 0, k = 1, 2, 3, \dots$ рівність (24) повинна співпадати відповідно з (18), (22), (23). Із цих умов знаходимо:

$$c_{n,0,0,s} = 1; \quad c_{n,m,0,s} = \frac{1}{(2^{2m}(n+2m-1)!)^2}; \quad c_{n,0,k,s} = \frac{1}{(p_{n,0,1,s} p_{n,0,2,s} \dots p_{n,0,k,s})^2}. \quad (25)$$

У загальному випадку підставимо (24) в обидві частини (21) та виконаємо інтегрування. У підсумку матимемо:

$$c_{n,m,k,s} = \frac{c_{n,m,k-1,s} + c_{n,m-1,k,s}}{p_{n,m,k,s}^2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) (k = 1, 2, 3, \dots), \quad (26)$$

де

$$p_{n,m,k,s} = (2n+4(m+k)+ks-4)(2n+4(m+k)+ks-2).$$

Отже, рекурентними формулами (25), (26) повністю визначені шукані коефіцієнти.

Доведемо тепер рівномірну збіжність рядів (13). Враховуючи, що $\max_{0 \leq r \leq a} B(r) = 1$ та виходячи з властивостей визначених інтегралів, з (20), (21) отримаємо оцінки:

$$\alpha_{n,0,k}(r) \leq \frac{1}{(2^{2k}(n+2k-1)!)^2} \left(\frac{r}{a}\right)^{2n+4k-2} \quad (k = 1, 2, 3, \dots); \quad (27)$$

$$\alpha_{n,m,k}(r) \leq \frac{1}{a^4} \int_0^r \frac{1}{r_0} \int_0^r \frac{1}{r_0} \int_0^r \frac{1}{r_0} \int_0^r r (\alpha_{n,m,k-1}(r) + \alpha_{n,m-1,k}(r)) dr dr dr dr \quad (m = 1, 2, 3, \dots) (k = 1, 2, 3, \dots). \quad (28)$$

Далі, виконуючи послідовно операції за рекурентною формулою (28) для вказаних значень індексів m, k з урахуванням (22), (27), приходимо до наступної загальної формули:

$$\alpha_{n,m,k}(r) \leq \frac{C_{m+k}^m}{(2^{2(m+k)}(n+2(m+k)-1)!)^2} \left(\frac{r}{a}\right)^{2n+4(m+k)-2} \quad (m=1,2,3,\dots)(k=1,2,3,\dots), \quad (29)$$

де C_{m+k}^m – число сполучень з $m+k$ по m .

Скориставшись (22), (27), (29), для рядів (13) будемо мати:

$$\begin{aligned} |X_n(r)| &\leq \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} K^k \Omega^{2m} \frac{(m+k)!}{m!k!(2^{2(m+k)}(n+2(m+k)-1)!)^2} \left(\frac{r}{a}\right)^{2n+4(m+k)-2} \leq \\ &\leq \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{K^k \Omega^{2m}}{m!k!} = \exp(K + \Omega^2) \quad (n=1,2). \end{aligned}$$

Як видно, у ролі мажоранти тут виступає константа. Тим самим доведено, що ряди (13) абсолютно й рівномірно збігаються. Аналогічно доводиться абсолютна й рівномірна збіжність подібних рядів із перших чотирьох похідних функцій $\alpha_{n,m,k}(x)$ ($n=1,2$).

Доведемо тепер, що функції $X_n(r)$ ($n=1,2$) лінійно незалежні. Допускаючи зворотне, вважатимемо, що виконується тотожність:

$$C_1 X_1(r) + C_2 X_2(r) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} (-K)^k \Omega^{2m} [C_1 \alpha_{1,m,k}(r) + C_2 \alpha_{2,m,k}(r)] = 0, \quad (30)$$

причому C_1, C_2 не дорівнюють нулю. Виконання цієї тотожності можливе тільки за умов:

$$C_3 \alpha_{1,m,k}(r) + C_4 \alpha_{2,m,k}(r) = 0 \quad (m=0,1,2,\dots)(k=0,1,2,\dots).$$

Зокрема, коли $m=0, k=0$, має бути виконано: $C_3 + C_4(r/a)^2 = 0$. Звідси $C_1 = C_2 = 0$. Отже, розв'язки $X_n(r)$ ($n=1,2$) лінійно незалежні. Крім цього, ґрунтуючись на аналізі формул (13), (18), (22)-(24), робимо висновок, що функції $X_n(r)$ ($n=1,2$) є безрозмірними.

Таким чином, функція прогину $W(r,t)$ визначена. Після цього динамічний кут повороту $\varphi(r,t)$ і динамічні зусилля в пластині $M_r(r,t), M_\theta(r,t), Q_r(r,t)$ визначаються за відомими формулами [2]:

$$\varphi(r,t) = \frac{\partial W}{\partial r}; \quad (31)$$

$$M_r(r,t) = -D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \right); \quad (32)$$

$$M_\theta(r,t) = -D \left(\mu \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \right); \quad (33)$$

$$Q_r(r,t) = -D \left(\frac{\partial^3 W}{\partial r^3} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial W}{\partial r} \right). \quad (34)$$

З метою виділити в правій частині формули (12) безрозмірний множник, вважатимемо $C_n = a \lambda_n$ ($n=1,2$), де λ_n – довільні безрозмірні константи. Після цього формулу для амплітудних прогинів (12) можемо записати у вигляді:

$$w(r) = a w_0(r); \quad (35)$$

$$w_0(r) = \lambda_1 X_1(r) + \lambda_2 X_2(r), \quad (36)$$

де $w_0(r)$ – безрозмірна функція. У подібному форматі запишемо також формули для перших трьох похідних від функції $w(r)$:

$$\frac{dw}{dr} = \tilde{w}_0(r), \quad (37)$$

$$\tilde{w}_0(r) = \lambda_1 \tilde{X}_1(r) + \lambda_2 \tilde{X}_2(r); \quad (38)$$

$$\frac{d^2 w}{dr^2} = \frac{1}{a} \widehat{w}_0(r), \quad (39)$$

$$\widehat{w}_0(r) = \lambda_1 \widehat{X}_1(r) + \lambda_2 \widehat{X}_2(r); \quad (40)$$

$$\frac{d^3 w}{dr^3} = \frac{1}{a^2} \widehat{w}_0(r), \quad (41)$$

$$\widehat{w}_0(r) = \lambda_1 \widehat{X}_1(r) + \lambda_2 \widehat{X}_2(r), \quad (42)$$

де

$$\widetilde{X}_n(r) = a \frac{dX_n(r)}{dr}, \quad \widehat{X}_n(r) = a^2 \frac{d^2 X_n(r)}{dr^2}, \quad \widehat{X}_n(r) = a^3 \frac{d^3 X_n(r)}{dr^3} \quad (n=1,2). \quad (43)$$

На відміну від похідних функцій $X_n(r)$, функції (43) будуть безрозмірними [22]. Далі називатимемо їх безрозмірними похідними.

Тим самим, амплітудну функцію прогинів і три її перші похідні виражено через безрозмірні функції $w_0(r)$, $\widetilde{w}_0(r)$, $\widehat{w}_0(r)$, $\widehat{w}_0(r)$. При цьому формули для динамічних переміщень (2), (31) і для динамічних зусиль (32)-(34) з урахуванням (35), (37), (39), (41) постануть у вигляді:

$$W(r,t) = a w_0(r)T(t); \quad (44)$$

$$\varphi(r,t) = \widetilde{w}_0(r)T(t); \quad (45)$$

$$M_r(r,t) = -\frac{D}{a} \left(\widehat{w}_0(r) + \mu \frac{a}{r} \widetilde{w}_0(r) \right) T(t); \quad (46)$$

$$M_\theta(r,t) = -\frac{D}{a} \left(\mu \widehat{w}_0(r) + \frac{a}{r} \widetilde{w}_0(r) \right) T(t); \quad (47)$$

$$Q_r(r,t) = -\frac{D}{a^2} \left(\widehat{w}_0(r) + \frac{a}{r} \widehat{w}_0(r) - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \widetilde{w}_0(r) \right) T(t). \quad (48)$$

У результаті можемо констатувати, що динамічні переміщення $W(r,t)$, $\varphi(r,t)$ і внутрішні зусилля $M_r(r,t)$, $M_\theta(r,t)$, $Q_r(r,t)$ виражені через безрозмірні фундаментальні функції $X_n(r)$ ($n=1,2$) та їхні безрозмірні похідні. Це дає можливість під час розрахунків пластин на коливання оперувати тільки безрозмірними величинами.

Безпосередньо з рівності (6) знаходимо:

$$\omega = \frac{\Omega}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}}. \quad (49)$$

Формула (49) встановлює аналітичну залежність частоти коливань ω від інших параметрів механічної системи, що розглядається. Фактично визначення ω зводиться до відшукування безрозмірної частоти Ω . Оскільки фундаментальні функції $X_n(r)$ ($n=1,2$), а також їхні безрозмірні похідні, залежать саме від безрозмірної частоти, то для її знаходження слугуватимуть частотні рівняння, які отримаємо після реалізації заданих граничних умов.

Приклад. Приведемо тут результати розрахунку для суцільної бетонної плити з жорстко закріпленим контуром, що опирається на пружну основу з квадратичною неоднорідністю:

$$k(r) = k(a) \left(\frac{r}{a} \right)^2.$$

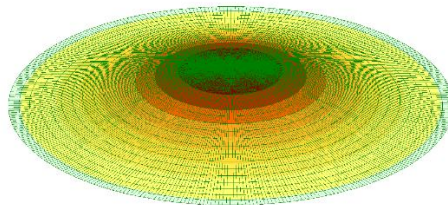
Вихідні дані для розрахунку:

$$E = 3 \cdot 10^7 \text{ кПа}; \quad \mu = 1/6; \quad \rho = 2500 \text{ кг/м}^3; \quad a = 6 \text{ м}; \quad h = 0,3 \text{ м}; \quad k(a) = 4 \cdot 10^3 \text{ кН/м}^3.$$

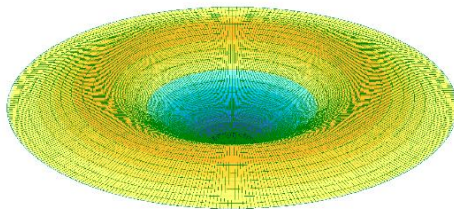
З метою верифікації авторського АМ, відповідні розрахунки також проведено МСЕ в програмному комплексі ЛІРА. Результати обчислень в числовому форматі представлено в табл. 1, а в графічному – на рис. 3.

Таблиця 1 – Значення частот вільних осесиметричних коливань

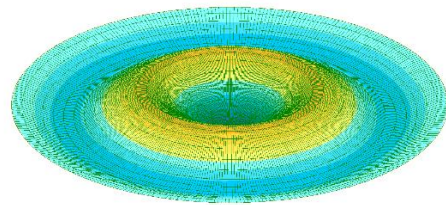
№ форми	Частоти коливань ω , рад/с		Відносна похибка, %
	АМ	МСЕ	
1	27,574622	27,669075	0,34
2	107,350531	102,780000	4,26
3	240,510460	228,970000	4,80
4	426,971819	405,900000	4,93
5	666,721322	633,400000	4,00



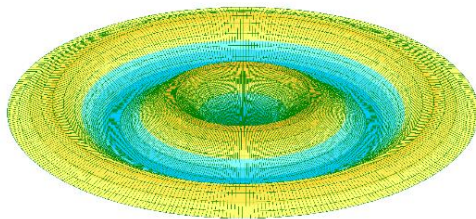
а) перша форма



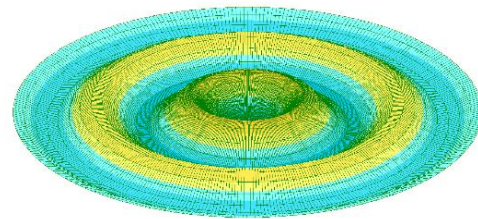
б) друга форма



в) третя форма



г) четверта форма



д) п'ята форма

Рис. 3. Перші п'ять осесиметричних форм коливань

Висновки:

1. Запропоновано аналітичний метод розрахунку на вільні осесиметричні коливання круглих суцільних пластин на степеневозмінній пружній основі. Даний метод не вимагає дискретизації конструкції і є реальною альтернативою застосуванню наближених методів при розв'язанні даного класу задач.

2. Будучи заснованим на точному розв'язку диференціального рівняння, метод дає змогу одержати достовірнішу картину коливань порівняно з наближеними методами. Адже саме точний розв'язок несе в собі інформацію якісного характеру і формує найповнішу картину фізичного явища, що вивчається.

3. Чисельно визначено похибку розрахунків МСЕ у програмному комплексі ЛІРА для конструкції що розглядалася.

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

Література

1. Foyouzat M. A., Mofid M., Akin J. E. Free vibration of thin circular plates resting on an elastic foundation with a variable modulus. *Journal of Engineering Mechanics*. 2016. Vol. 142, № 4. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001050](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001050)
2. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. *Theory of plates and shells*. New York: McGraw-Hill, 1959. 580 p.
3. Timoshenko S. *Vibration problems in engineering*. 3rd ed. New York: Van Nostrand, 1955. 468 p.
4. Вайнберг Д. В., Вайнберг Є. Д. Розрахунок пластин. К.: Будівельник, 1970. 264 с.
5. Krutii Yu. S., Sur'yaninov M. G., Karnaukhova G. S. Calculation method for axisymmetric bending of circular and annular plates on a changeable elastic bed. Part 1. Analytical relations. *Strength of Materials*. 2021. Vol. 53, № 2. P. 247–257. <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00282-2>
6. Krutii Y. S., Sur'yaninov M. G., Soroka M. M., et al. Calculation method for axisymmetric bending of circular and annular plates on a changeable elastic bed. Part 2. Calculation results for continuous circular plates. *Strength of Materials*. 2021. Vol. 53, № 3. P. 417–422. <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00301-2>
7. Laura P. A. A., Gutierrez R. H., Carnicer R., Sanzi H. C. Free vibrations of a solid circular plate of linearly varying thickness and attached to a Winkler foundation. *Journal of Sound and Vibration*. 1991. Vol. 144, № 1. P. 149–161. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90738-6](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90738-6)
8. Girgin Z. Canan, Girgin Konuralp. A numerical method for static or dynamic stiffness matrix of non-uniform members resting on variable elastic foundations. *Engineering Structures*. 2005. Vol. 27, № 9. P. 1373–1384. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.04.005>
9. Mirkhalaf Valashani S. M. Transverse vibration of clamped and simply supported circular plates with an eccentric circular perforation and attached concentrated mass. *Journal of Solid Mechanics*. 2009. Vol. 1, № 1. P. 37–44.
10. Rao L. B., Rao C. K. Vibrations of Elastically Restrained Circular Plates Resting on Partial Winkler Foundation. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2009. Vol. 34, № 1B. P. 68–74. <https://doi.org/10.2174/1874837600902010068>
11. Haido James H., Bakar Badorul Hisham Abu, Abdul-Razzak Ayad A., Jayaprakash J. Dynamic Performance of Circular Reinforced Concrete Slabs. *Gaza Conference*, Gaza. October 2010. URL: <https://www.researchgate.net/publication/328149106> (дата звернення: 10.05.2025).
12. Alipour M.M., Shariyat M., Shaban M. A Semi-Analytical Solution for Free Vibration and Modal Stress Analyses of Circular Plates Resting on Two-Parameter Elastic Foundations. *Journal of Solid Mechanics*. 2010. Vol. 2, № 1. P. 63–78.
13. Rao L. B., Rao C. K. Free Vibration of Circular Plates with Elastic Edge Support and Resting on an Elastic Foundation. *International Journal of Acoustics and Vibrations*. 2012. Vol. 17, № 4. P. 204–207. <https://doi.org/10.20855/ijav.2012.17.4311>
14. Rao L. B., Rao C. K. Vibrations of Circular Plates with Guided Edge and Resting on Elastic Foundation. *Journal of Sound and Vibration*. 2012. Vol. 331, № 24. P. 5300–5315.
15. Tufoi Marius, Gillich Gilbert-Rainer, Praisach Zeno-Iosif, Ntakpe Jean Loius, Hatiegan Cornel. An Analysis of the Dynamic Behavior of Circular Plates from a Damage Detection Perspective. *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*. 2014. Vol. 11, № 1. P. 41–46.
16. Rao L. B., Rao C. K. Vibrations of Circular Plates with Elastically Restrained Edge against Translation and Resting on Elastic Foundation. *Journal of Engineering Research*. 2016. Vol. 13, № 2. P. 187–196. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol15iss1pp14-25>
17. Rao L. B., Rao C. K. Vibrations of Circular Plates Resting on Elastic Foundation with Elastically Restrained Edge Against Translation. *The Journal of Engineering Research*. 2018. Vol. 15, № 1. P. 14–25. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol15iss1pp14-25>
18. Salawu S. A., Sobamowo M. G., Sadiq O. M. Analytical approach into dynamic behavior of functionally graded circular plates resting on two-parameter foundations under excitation force. *The Scientific World Journal*. 2019. Vol. 139, № 2. P. 115–134.

<https://doi.org/10.24200/tjer.vol15iss1pp14-25>

19. Salawu S. A., Sobamowo M. G., Sadiq O. M. Dynamic Investigation of Nonlinear Free Vibration of Circular Plates Resting on Winkler and Pasternak Foundations. *International Journal of Mechanical Handling and Automation*. 2019. Vol. 5, № 2. P. 19–42.

20. Salawu S. A., Sobamowo M. G., Sadiq O. M. Investigation of Dynamic Behaviour of Circular Plates Resting on Winkler and Pasternak Foundations. *Annals of Faculty Engineering Hnedoara – International Journal of Engineering*. 2019. Vol. XVII, № 4. P. 125–136.

21. Sobamowo M. G., Salawu S. A. Free Vibration Analysis of Nonlinear Circular Plates Resting on Winkler and Pasternak Foundations. *Journal of Solid Mechanics*. 2020. Vol. 12, № 1. P. 121–135.

22. Крутий Ю. С. Розробка методу розв'язання задач стійкості і коливань деформівних систем зі змінними неперервними параметрами: Дис. д-ра техн. наук. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2016.

References

- [1] M.A. Foyouzat, M. Mofid, J.E. Akin, "Free vibration of thin circular plates resting on an elastic foundation with a variable modulus", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 142, no. 4, 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001050](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001050)
- [2] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells*. New York: McGraw-Hill, 1959.
- [3] S. Timoshenko, *Vibration problems in engineering*. 3rd ed. New York : Van Nostrand, 1955.
- [4] D.V. Vainberh, Ye.D. Vainberh, *Rozrakhunok plastyn*. K.: Budivelnnyk, 1970.
- [5] Yu.S. Krutii, M.G. Sur'yaninov, G.S. Karnaukhova, "Calculation method for axisymmetric bending of circular and annular plates on a changeable elastic bed. Part 1. Analytical relations", *Strength of Materials*, vol. 53, no. 2, pp. 247–257, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00282-2>
- [6] Y.S. Krutii, M.G. Sur'yaninov, M.M. Soroka et al., "Calculation method for axisymmetric bending of circular and annular plates on a changeable elastic bed. Part 2. Calculation results for continuous circular plates", *Strength of Materials*, vol. 53, no. 3, pp. 417–422, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00301-2>
- [7] P.A.A. Laura, R.H. Gutierrez, R. Carnicer, H.C. Sanzi, "Free vibrations of a solid circular plate of linearly varying thickness and attached to a Winkler foundation", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 144, no 1, pp. 149–161, 1991. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90738-6](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90738-6)
- [8] Girgin Z. Canan, Girgin Konuralp, "A numerical method for static or dynamic stiffness matrix of non-uniform members resting on variable elastic foundations", *Engineering Structures*, vol. 27, no 9, pp. 1373–1384, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.04.005>
- [9] S.M. Mirkhalaf Valashani, "Transverse vibration of clamped and simply supported circular plates with an eccentric circular perforation and attached concentrated mass", *Journal of Solid Mechanics*, vol. 1, no. 1, pp. 37–44, 2009.
- [10] L.B. Rao, C.K. Rao, "Vibrations of Elastically Restrained Circular Plates Resting on Partial Winkler Foundation", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 34, no. 1B, pp. 68–74, 2009. <https://doi.org/10.2174/1874837600902010068>
- [11] H. Haido James, Bakar Badorul Hisham Abu, Abdul-Razzak Ayad A., J. Jayaprakash, "Dynamic Performance of Circular Reinforced Concrete Slabs", *Gaza Conference*, Gaza. October 2010. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/328149106> Accessed on: May 10, 2025.
- [12] M.M. Alipour, M. Shariyat, M.A. Shaban, "Semi-Analytical Solution for Free Vibration and Modal Stress Analyses of Circular Plates Resting on Two-Parameter Elastic Foundations", *Journal of Solid Mechanic*, vol. 2, no. 1, pp. 63–78, 2010.

- [13] L.B. Rao, C.K. Rao, "Free Vibration of Circular Plates with Elastic Edge Support and Resting on an Elastic Foundation", *International Journal of Acoustics and Vibrations*, vol. 17, no. 4, pp. 204–207, 2012. <https://doi.org/0.20855/ijav.2012.17.4311>
- [14] L.B. Rao, C.K. Rao, "Vibrations of Circular Plates with Guided Edge and Resting on Elastic Foundation", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 331, no. 24, pp. 5300–5315, 2012.
- [15] Tufoi Marius, Gillich Gilbert-Rainer, Praisach Zeno-Iosif, Ntakpe Jean Loius, Hatiegan Cornel, "An Analysis of the Dynamic Behavior of Circular Plates from a Damage Detection Perspective", *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, vol. 11, no. 1, pp. 41–46, 2014.
- [16] L.B. Rao, C.K. Rao, "Vibrations of Circular Plates with Elastically Restrained Edge against Translation and Resting on Elastic Foundation", *Journal of Engineering Research*, vol. 13, no. 2, pp. 187–196, 2016. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol15iss1pp14-25>
- [17] L.B. Rao, C.K. Rao, "Vibrations of Circular Plates Resting on Elastic Foundation with Elastically Restrained Edge Against Translation", *The Journal of Engineering Research*, vol. 15, no. 1, pp. 14–25, 2018. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol15iss1pp14-25>
- [18] S.A. Salawu, M.G. Sobamowo, O.M. Sadiq, "Analytical approach into dynamic behavior of functionally graded circular plates resting on two-parameter foundations under excitation force", *The Scientific World Journal*, vol. 139, no. 2, pp. 115–134, 2019. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol15iss1pp14-25>
- [19] S.A., Salawu, M.G. Sobamowo, O.M. Sadiq, "Dynamic Investigation of Nonlinear Free Vibration of Circular Plates Resting on Winkler and Pasternak Foundations", *International Journal of Mechanical Handling and Automation*, vol. 5, no. 2, pp. 19–42, 2019.
- [20] S.A. Salawu, M.G. Sobamowo, O.M. Sadiq, "Investigation of Dynamic Behaviour of Circular Plates Resting on Winkler and Pasternak Foundations", *Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*, vol. XVII, no. 4, pp. 125–136, 2019.
- [21] M.G. Sobamowo, S.A. Salawu, "Free Vibration Analysis of Nonlinear Circular Plates Resting on Winkler and Pasternak Foundations", *Journal of Solid Mechanics*, vol. 12, no. 1, pp. 121–135, 2020.
- [22] Yu.S. Krutii, "Rozrobka metodu rozviazannia zadach stiikosti i kolyvan deformivnykh system zi zminnymy neperervnymy parametramy: Dis. d-ra tekhn. nauk", Lutsk National Technical University, Lutsk, 2016.

CALCULATION OF FREE AXISYMMETRIC VIBRATIONS OF CIRCULAR PLATES SUPPORTED BY A POWER-VARIABLE ELASTIC WINKLER BASE

¹**Krutii Yu.S.**, Dr. Sc., Professor,

yurii.krutii@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7105-3087

¹**Perperi A.O.**, Ph.D., Associate Professor,

a.perperi@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7112-6864

¹**Velychko D.V.**, postgraduate,

velychko.engineer@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7837-872X

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

4, Didrikhson str., Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. This publication is about further development of analytical methods for calculating free vibrations of circular plates resting on an inhomogeneous continuous elastic Winkler foundation. The inhomogeneity of the elastic foundation is described by a variable subgrade modulus. The case of subgrade modulus represented by a power function is considered. The fundamental functions of the corresponding vibration equation for circular solid plates are written down in an explicit closed form. These functions are dimensionless and are represented by absolutely and uniformly convergent

double power series. In turn, these functions are used to express the formulas for the dynamic parameters of the plate state, such as deflection, angle of rotation, radial and circular bending moments, and shear force. An analytical representation for the frequency of free vibrations of the plate is obtained, which establishes its dependence on the dimensionless frequency and other mechanical parameters of the system. The dimensionless frequency, in turn, is determined from the frequency equations, which are obtained after the implementation of the specified boundary conditions.

The practical application of the obtained solutions is demonstrated by an example. A concrete slab with a rigidly fixed contour resting on a power-variable elastic foundation is examined. The first five frequencies of axisymmetric vibrations are calculated by the authors' method (AM). The corresponding first five modes are also presented in graphical format. The numerical values obtained by AM are treated as accurate, since the used 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 calculations obtained using various approximate methods by comparison. For the purpose of such a comparison, the paper presents the results of the calculation obtained by the finite element method (FEM). The relative error of the FEM in the calculation of this structure is determined.

Keywords: circular plate, inhomogeneous base, Winkler's hypothesis, variable bedding coefficient, axisymmetric vibrations, analytical solution.

Стаття надійшла до редакції 12.05.2025

[This work](#) © 2025 by [Krutii Yu.S.](#), [Perperi A.O.](#), [Velychko D.V.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

**INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF BUILDING STRUCTURES
DAMAGED BY EMERGENCY SITUATION**

¹**Kushnir O.**, Ph.D., Associate Professor,
amkushnir@odaba.edu.ua, ORCID: 0009-0004-4305-1796

¹**Kushnir V.**, graduate student,
vak2705@odaba.edu.ua, ORCID: 0009-0009-1891-2845

¹**Grynyova I.**, Ph.D., Associate Professor,
grynyova@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7637-6029

¹**Bichev I.**, Ph.D., Associate Professor,
bichev@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3000-2600

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

Abstract. The article investigates the stress-strain state of building structures damaged due to an emergency situation resulting from a missile strike on a building in Odesa. The study aimed to comprehensively analyze the technical condition of the damaged structure, evaluate the impact of the missile strike on bearing capacity and deformation behavior, and provide recommendations for restoration. The authors conducted detailed instrumental inspections utilizing non-destructive testing techniques, performed topographic and geodetic surveys to determine structural verticality, and carried out verification analyses using the "LIRA-SAPR" software. Significant damages to columns, floor slabs, and external walls were identified, creating a risk of progressive structural collapse. The structures were classified as being in an emergency state, with damage levels reaching up to 80%. The proposed restoration measures involve dismantling and reconstruction of damaged elements, reinforcement of load-bearing structures using metallic components, installation of temporary support systems, and ongoing structural health monitoring. Particular attention was paid to determining the actual concrete strength, corresponding to the concrete class C20/25 (B25). Reinforcement parameters, such as the diameter and concrete cover thickness of the working reinforcement in columns and floor slabs, were also investigated. It was found that the actual concrete cover thickness significantly deviated from standard values, which must be considered when planning restoration and reinforcement measures. The research underscores the importance of adopting a comprehensive approach to analyzing damaged buildings, incorporating modern techniques such as 3D scanning for accurate spatial modeling and minimizing design and restoration errors. The obtained results can improve the effectiveness of design solutions for the reconstruction of buildings damaged by emergency situations and contribute to developing advanced methodologies for assessing structural integrity and operational reliability in comparable scenarios.

Keywords: examination, defects, destruction, restoration, non-destructive methods.

Introduction. In many fields, such as biology, technology, or management, it is crucial to understand how an object ages over time. Forecasting the degradation process throughout the life cycle of an object allows for efficient planning of repair works. Maintaining residential buildings in good technical condition requires optimal planning of repair activities. For this, it is necessary to accurately determine the scope and program of reconstruction, which involves diagnosing the technical condition.

Accurately determining the state of the building, identifying the causes of damage, and forecasting adverse changes enable proper planning of repair works. Diagnosis is the foundation for organizing repair works of any technical object correctly. It encompasses the assessment of the technical condition, the causes of its deterioration, and the prediction of the degradation process.

Analysis of recent research and publications. The diagnosis of the technical condition of buildings can be carried out by two methods. The first method includes the assessment of adverse changes in objects based on on-site inspections, non-destructive testing, measurements, and calculations. The second method is a predictive approach, which relies on forecasting the building's

degradation process in the program complex.

We know that under normal operation, using ISO 7162:1992 [1], we can evaluate the performance characteristics of a building. Additionally, by using the predicted service life distribution curve (PSLDC), it becomes possible to consider changes in these characteristics. The ISO standards [2, 3] provide general guidelines on the issues related to the prediction of building service life.

Several normative documents and standards are used in the US and Europe to guide building condition assessments so that structures are made safe, durable and functional.

European nations have their national standards for building condition assessments which are underpinned by EU-wide rules. To ensure that structures are safe and serviceable, the European Standard EN 1990 (Eurocode: Basis of Structural Design) gives general principles. Besides this, different countries have their own codes; for example, the UK uses RICS Building Surveys and Technical Due Diligence of Commercial Property standard.

In the US, ASTM International and the American Society of Civil Engineers (ASCE) are some of the organizations that came up with standards for building condition assessments. ASTM E2018-15, "Standard Guide for Property Condition Assessments: Baseline Property Condition Assessment Process" is commonly used. It explains how to do visual inspections and prepare reports on the state of the property.

Both areas also stress on the need for carrying out frequent evaluations so as to discover risks brought about by weaknesses in construction. Life cycle analysis together with detailed engineering appraisal form part of methods used to carry out comprehensive building inspection [4, 5]. Such appraisals touch on various parts like structural soundness, mechanical plant installations, electrical wiring systems as well as conformity with safety regulations.

In Ukraine, there were documents regulating the assessment of the technical condition of buildings, but in this case, the article focuses on new recommendations resulting from military actions. Additionally, several laws have been enacted [6-9] regarding the procedures for interacting with objects damaged due to military actions.

The study of the stress-strain state of structures damaged by missile attacks is highly relevant. After conducting field experiments, it is necessary to perform simulations in specialized software using the finite element method. Simulations of damaged reinforced concrete structures have been carried out, for example, beams [10-16], columns [17], floor slabs [18], including combined work of slabs and columns [19], masonry walls [20], and the combined work of walls and slabs [21]. Researchers are also interested in simulating entire buildings for reconstruction or other impacts, such as an industrial building [22], a church under seismic impact, and a multi-story residential building subjected to vibrations. These examples show significant interest in modeling both individual structures and entire buildings. However, in our opinion, simulations conducted due to military attacks are still insufficient.

Research Aim and Objectives. The study aimed to comprehensively analyze the technical condition of the damaged structure, evaluate the impact of the missile strike on bearing capacity and deformation behavior, and provide recommendations for restoration.

Research objectives:

1. Assess the general technical state of the building and the condition of its primary load-bearing and enclosing structures.
2. Identify defects and damages affecting the load-bearing capacity of the main structures and provide recommendations for their remediation.
3. Determine the main actual operational loads and impacts on the structures.
4. Investigate the causes of defects and damages that altered the primary design and calculated geometric parameters and physical characteristics of the building structures due to non-design impacts (fires, military actions, and terrorist acts), as well as during the building's operational period.
5. Verify the verticality of the building through topographic and geodetic surveys.
6. Examine the strength of the concrete and the actual reinforcement of columns and floor slabs by conducting instrumental tests using non-destructive testing methods.
7. Perform verification calculations of the building's load-bearing structures using the software complex PC "LIRA-SAPR".
8. Determine the feasibility and provide recommendations for the building's continued safe operation and major repairs.

Research materials and methodology. The object of study is a non-residential building of a shopping center with integrated and attached office premises (Fig. 1). Year of construction – 2007. Building classification – 1220 "Office Buildings", according to NK 018:2023 "Classifier of Buildings and Structures". Consequence (responsibility) class of the building – CC3, in accordance with Article 32 of the Law of Ukraine No. 1817-VIII dated January 17, 2017 "On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine Concerning the Improvement of Urban Development Activities", DSTU 8855:2019 "Determination of the Consequence (Responsibility)".

Class of Buildings and Structures. "Fire resistance class of the building – II, according to DBN V.1.1.7-2016 "Fire Safety of Construction Sites".

The building is 11 stories high in axes "A-H, 1-9" and 3 stories high with a basement floor and a complex plan shape, standing independently. The entire building has a basement floor used as a parking area. There is a deformation joint in axes "B-G, 9-10" that separates the 11-story and 3-story sections into distinct parts. Another deformation joint divides the 3-story section into two separate parts. The total height of the building is 38.1 m. The conditional height of the building is 35.1 m. Floor heights: basement (parking) – 2.75 m; 1st floor – 3.75 m; 2nd to 11th floors – 3.0 m.

The building is equipped with two passenger elevators of the OTIS type with a load capacity of 400 kg and one freight elevator. The three-story part of the building contains two escalators.



Fig. 1. General appearance of the facade of the building

Structural solutions of the building. Structural scheme: frame, frameless with load-bearing reinforced concrete monolithic columns, slabs, diaphragms, and stiffness cores. Foundations: pile foundations with monolithic reinforced concrete grillage. Columns: monolithic, reinforced concrete with a constant square cross-section of 400×400 mm, 500×500 mm, and 500×700 mm. Stiffness diaphragms: monolithic reinforced concrete, 250 mm thick. Stiffness cores: monolithic reinforced concrete, 150 mm and 200 mm thick. Internal stairs: prefabricated reinforced concrete flights and landings made of large-sized elements of industrial production. Floor slabs: monolithic reinforced concrete, beamless, 200 mm thick. Roof structure: flat combined, with a brick parapet around the perimeter. Roof covering: flexible roll roofing, roofing felt.

The results of the research. The epicenter of the explosion was located at the level of the 8th-9th floors of the building in axes "A-B, 6-7", which led to various types of damage. The explosion significantly damaged and partially destroyed the load-bearing and enclosing structural elements of the building. There are emergency damages to the building's structures in the form of holes, shrapnel damage, deformations, ruptures, fire damage, geometry violations, and connection damages to structures and systems. The nature of the damage to the object under investigation is associated with the impact of explosive elements, the fall of rocket fragments, and the significant force of the explosive wave inertia.

During the investigation of the stress-strain state of the building, it was established:

1. Significant defects and damages in the load-bearing structures of columns, floor slabs, and enclosing walls of the building, disrupting and limiting normal operation.

2. Spatial rigidity and geometric invariability of the load-bearing and enclosing structures in axes "A-B, 5-9" are not ensured. Significant damages present may lead to further brittle failure of structures.

3. The external self-supporting walls in axes "A-B, 5-7" at the level of the 8th and 9th floors are destroyed (Fig. 2-5), the degree and nature of existing damages in the adjacent walls indicate the danger of emergency collapse.

4. Conservation of the load-bearing and enclosing structures at the time of inspection is absent. Temporary reinforcement structures of floor slabs above the 9th-10th floors are present.

5. The foundations, blind area, porches, stairs are in satisfactory "2" technical condition.

6. The floor structures, roof, and engineering networks are in unfit for normal operation "3" technical condition.

7. Damaged structures of columns, external walls, parapet walls, lintels, floor slabs, partitions, drainage, window and door blocks, internal and external finishes are in emergency technical condition "4".

8. According to the presented inspection results and considering the requirements of DSTU-N B V.1.2-18:2016 "Guidelines for the inspection of buildings and structures to determine and assess their technical condition", the overall technical condition of the object under investigation is assessed as – "4" emergency.

9. The general category of damage to the object under investigation is II. The overall degree of damage to the object under investigation is 57%, and the coefficient of functional suitability for operation is 43%.

10. Individual structures of the building, namely columns, floor slabs, walls, partitions, and filling of openings have a significant degree of damage from 55% to 80%.

11. According to the results of topographic and geodetic works on the verification of the verticality of the building's structures, it was established that the external walls partially have a tilt from 2 mm to 48 mm in the direction away from the building. Monolithic reinforced concrete columns have deviations from the vertical from 8 mm to 33 mm.

12. As a result of the verification calculations, it was established that the building has a practically uniform distributed settlement under all the foundations, which has formed over a long period of building operation.

13. According to the calculation results, it is recommended to frame the damaged columns with metal corners – 100×7 and metal plates – 6×50×100 mm and reinforce the floor slabs at the places of cracks, damages, and deformations.

14. A comprehensive analysis of the structural solutions of the object under investigation, the assessment of its stress-strain state, the analysis of identified defects and damages, the overall technical condition, categories, and degree of damage indicate the possibility and necessity of major repairs of the object, with partial dismantling, reinforcement, and restoration of load-bearing and enclosing structures.

Conventional designations of defects and damages:

1. Significant damage to columns. Perform dismantling and restoration.

2. Damage to columns. Perform reinforcement.

3. Significant damage to floor structures. Perform partial dismantling and restoration.

4. Technological damages (equipment passage holes, exposure, and damage of working reinforcement), cracks.

5. Perform reinforcement of columns, diaphragms, and floor slabs at locations of holes and reinforcement damage.

6. Significant damage to external walls. Perform dismantling and restoration.

7. Significant damage to partitions. Perform dismantling and restoration.

8. Significant damage to ceiling finishes. Perform dismantling and restoration.

9. Significant damage to openings infill (windows, doors). Perform dismantling and restoration.

10. Damage to brick parapet structures and ventilation channels. Perform partial dismantling and restoration.

11. Roof damage. Perform dismantling and restoration.

12. Roof damage. Perform restoration.

13. Damage to external finishes (brickwork, insulation of floor slabs). Perform dismantling and

restoration.

14. Damage to internal finishes. Perform dismantling and restoration.

15. Damage to floor structures. Perform dismantling and restoration.

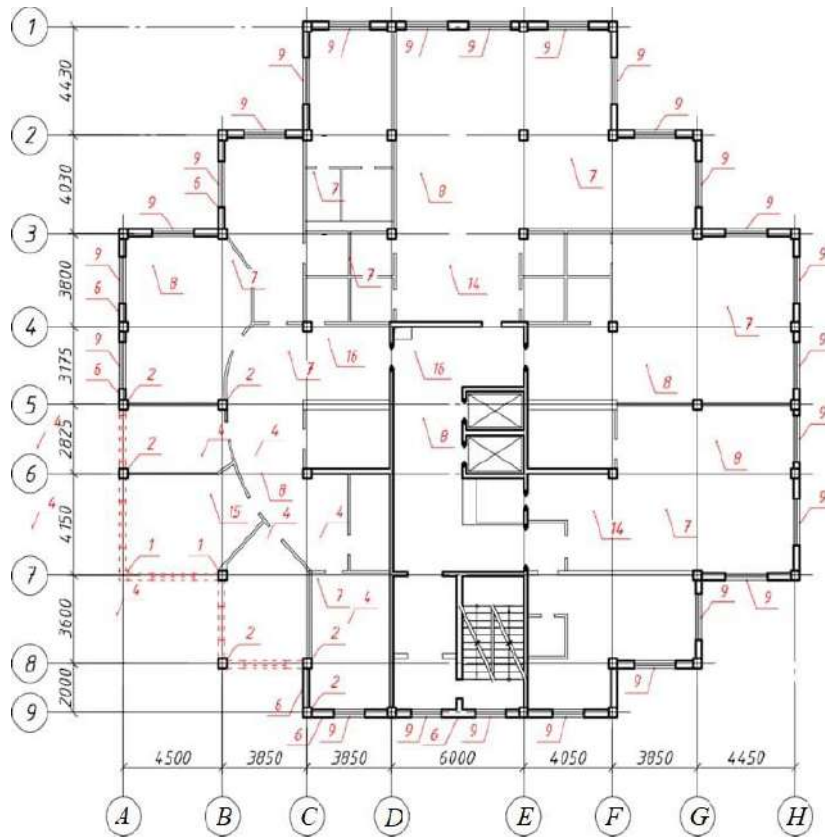


Fig. 2. Diagram of damage location. 8th floor

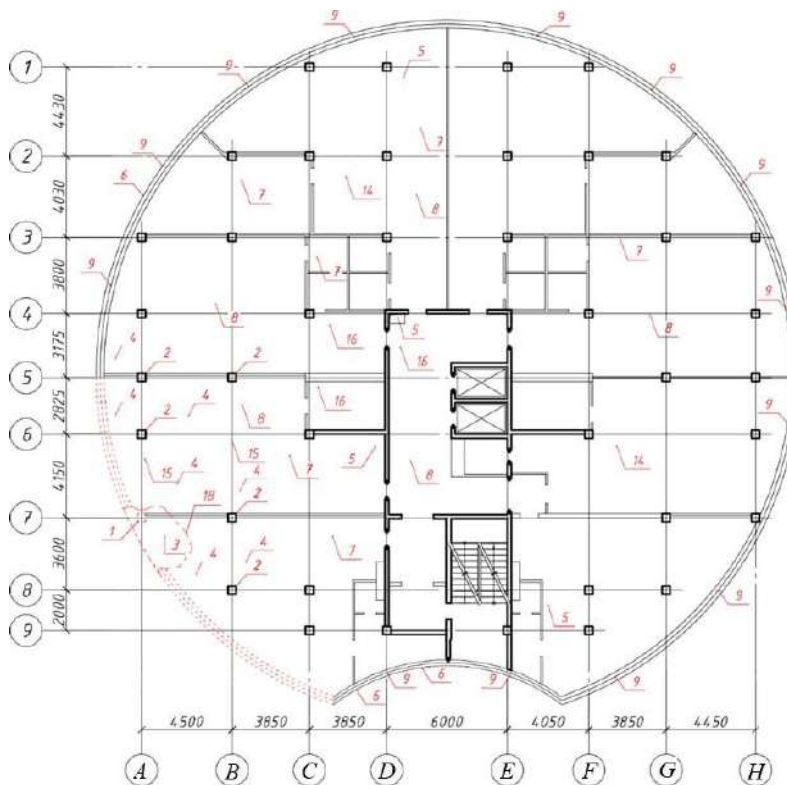


Fig. 3. Diagram of damage location. 9th floor

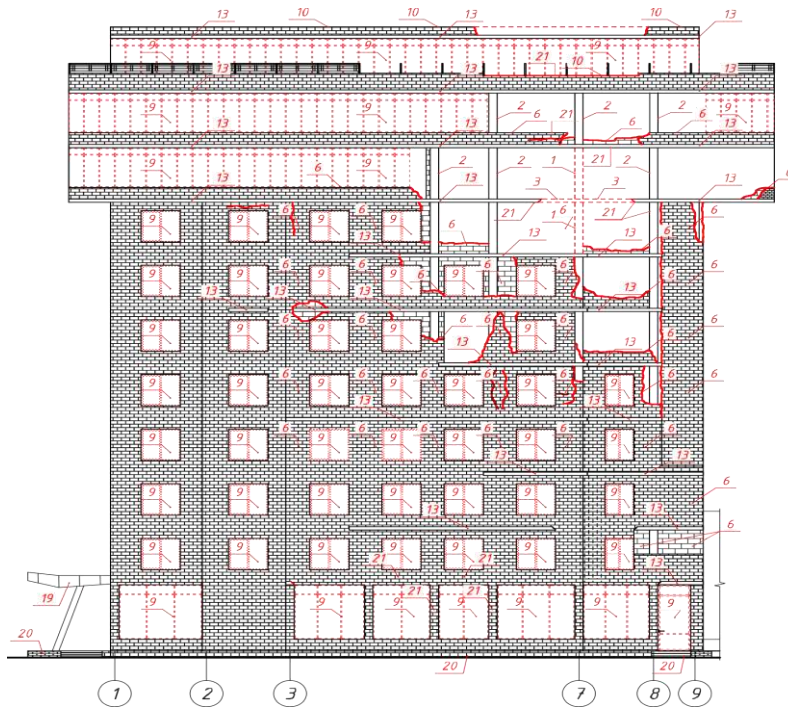


Fig. 4. Damage location scheme. Facade 1-9



Fig. 5. Diagram of the location of the damage to the A-H facade

1. Significant damage to engineering systems and equipment. Perform dismantling and restoration.
2. Traces of atmospheric precipitation leakage.
3. Emergency area.
4. Corrosion of metal structures.
5. Damage to paving and porches.
6. Traces of fire.

Determination of the concrete strength of reinforced concrete columns and floor slabs was

carried out as a result of instrumental studies of building structures using non-destructive testing methods. The study of the strength characteristics of the concrete of monolithic reinforced concrete structures of columns and slabs (f_c , kg/cm²) was conducted based on the methodology presented in DSTU B V.2.7-220:2009 "Concretes. Determination of strength by mechanical non-destructive testing methods". The concrete strength was determined using a sclerometer MS-225 (Schmidt hammer) with factory number No. 19856422, manufactured by Firma Morek MULTISERW. The sclerometer is based on the rebound method. The instrument underwent state metrological certification No. 430/MX-VDM on 16.05.2023. Testing was carried out at a positive concrete temperature. The characteristics of the concrete of monolithic reinforced concrete structures of columns and slabs were determined in places where the surface areas of the structure had been previously cleaned. Testing was conducted on a structure area ranging from 100 cm² to 600 cm².

The following minimum distances were adopted during testing:

- between impact points not less than 30 mm;
- from the edge of the structure to the test point not less than 50 mm;
- from the test points to the reinforcement not less than 50 mm.

Concrete testing was carried out in the following sequence:

- determining the location of the reinforcement in the test area according to DSTU B V.2.6-4;
- the sclerometer (Schmidt hammer) was positioned so that the force was applied perpendicular to the tested surface in accordance with the operational documents of the device;
- the position of the sclerometer during the testing of the structure relative to the horizontal was taken to be the same as during the testing of samples to establish the relationship, with corrections made to the readings if the position was different, according to the operational documents of the sclerometer;
- recording the value of the indirect characteristic in accordance with the operational documents of the device;
- calculating the average values of the indirect characteristics in the structure area.

The value of the concrete strength of the columns at each point was obtained as an average of the results of 10 measurements. The obtained strength values are presented in Table 1.

Table 1 – Determination of concrete strength of reinforced concrete columns

№ (№ points)	The edge of the structure	Value of concrete strength according to measurements					The average value of strength f_{cm} (kg/cm ²)	The average strength of concrete construction f_{cm} , MPa	Average square deviation s_m , MPa	Coefficient of variation, V_c , %
		1	2	3	4	5				
		f_i (kg/cm ²)								
Date of concrete tests – 23.09.2023										
1	+90 ⁰	418.1	428.3	448.7	397.7	305.9	399.7	39.2	55.6	14
2	+90 ⁰	387.5	428.3	428.3	428.3	387.5	412	40.4	22.3	5
3	+90 ⁰	448.7	397.7	397.7	428.3	397.7	414	40.6	23.5	6
4	+90 ⁰	428.3	428.3	448.7	489.5	438.5	446.7	43.8	25.4	6
5	+90 ⁰	387.5	418.1	428.3	448.7	397.7	416.1	40,8	24.4	6
6	+90 ⁰	448.7	428.3	418.1	397.7	499.7	438.5	43	38.8	9
7	+90 ⁰	387.5	407.9	407.9	428.3	397.7	405.9	39,8	15.1	4
8	+90 ⁰	428.3	407.9	387.5	418.1	407.9	409.9	40.2	15.1	4
9	+90 ⁰	418.1	387.5	428.3	418.1	438.5	418.1	41	19.1	5
10	+90 ⁰	407.9	407.9	438.5	397.7	387.5	407.9	40	19.1	5

The actual strength of concrete columns, according to the conducted instrumental tests, ranges from 39.2 MPa to 43.8 MPa. According to the results of processing the obtained data, the average

value of the group coefficient of variation of concrete strength V_{cm} is 6.4%, and the average value of concrete strength is $f_n = 40.9$ MPa.

The strength of concrete f_c , MPa when normalizing strength by classes is:

$$f_c = 0.95 \times f_n \times \frac{k_t}{100} = 0.95 \times 40.9 \times \frac{84}{100} = 32.64 \text{ MPa}$$

where is f_n – average concrete strength, MPa;

$k_t = 84$ – coefficient of required strength in percentage for all types of concrete, which is taken according to Table B.1 (DSTU B V.2.7-224:2009) depending on the average value of the group coefficient of variation of concrete strength V_{cm} .

According to the conducted instrumental tests and the processing of the obtained data, it has been established that the strength of concrete columns is $f_c = 32.64$ MPa, which corresponds to the concrete class C20/25 (B25).

The strength values of concrete floor slabs at each point were obtained as the average of the results of 10 measurements. The obtained strength values are presented in Table 2.

The strength values of reinforced concrete monolithic floor slabs at each point were obtained as the average of the results of 10 measurements. The obtained strength values are presented in Table 2.

Table 2 – Determination of concrete strength of reinforced concrete monolithic floor slabs

№ (№ points)	The edge of the structure	Value of concrete strength according to measurements					The average value of strength f_{cm} (kg/cm ²)	The average strength of concrete construction, f_{cm} , MPa	Average square deviation s_m , MPa	Coefficient of variation V_c , %
		1	2	3	4	5				
		f_i (kg/cm ²)								
Date of concrete tests – 23.09.2023										
1	+90 ⁰	397.7	428.3	443.6	397.7	393.6	412.2	40.4	22.4	5
2	+90 ⁰	407.9	428.3	434.4	423.2	393.6	417.5	40.9	16.6	4
3	+90 ⁰	428.3	424.2	443.6	431.3	397.7	425	41.7	16.9	4
4	+90 ⁰	423.2	372.2	395.6	433.4	413	407.5	40	24.2	6
5	+90 ⁰	390.6	387.5	413	428.3	397.7	403.4	39.6	17	4
6	+90 ⁰	443.6	427.3	438.5	397.7	499.7	441.4	43.3	37.2	8
7	+90 ⁰	403.8	380.4	376.3	448.7	397.7	401.4	39.4	28.8	7
8	+90 ⁰	428.3	387.5	431.3	428.3	410.9	417.3	40.9	18.5	4
9	+90 ⁰	424.2	433.4	428.3	413	438.5	427.5	41.9	9.7	2
10	+90 ⁰	397.7	428.3	438.5	382.4	387.5	406.9	39.9	25.1	6

The actual strength of the concrete floor slabs, according to the conducted instrumental tests, is in the range from 39.4 MPa to 43.3 MPa. According to the results of processing the obtained data, the average value of the group coefficient of variation of concrete strength V_{cm} is 5.0%, and the average strength value of the concrete is $f_n = 40.8$ MPa.

The concrete strength f_c , MPa for strength classification by classes is:

$$f_c = 0.95 \times f_n \times \frac{k_t}{100} = 0.95 \times 40.8 \times \frac{83}{100} = 32.17 \text{ MPa}$$

where: f_n is the average strength value of concrete, MPa;

$k_t = 83$ – the coefficient of required strength in percentage for all types of concrete, accepted according to Table B.1 (DSTU B V.2.7-224:2009) depending on the average value of the group coefficient of variation of concrete strength V_{cm} .

According to the conducted instrumental tests and the processing of the obtained data, it has been established that the strength of the concrete floor slabs is $f_c = 32.17$ MPa, which corresponds to the class of concrete C20/25 (B25).

The determination of the diameter of reinforcement, concrete cover thickness, and spacing of working bars of the reinforcement cages of reinforced concrete columns and floor slabs was carried out using non-destructive methods. The research was conducted in accordance with: DSTU B V.2.6-4-95 (GOST 22904-93) "Buildings and structures. Reinforced concrete structures. Magnetic method for determining the thickness of the concrete cover and the location of the reinforcement".

During the research, a non-destructive testing device "Concrete Cover Thickness Measuring Instrument NOVOTEST Armature Scope", factory number №0162120720, calibration certificate №10-0/11484/1 dated 05.10.2022 was used.

The main results of the instrumental testing of the reinforcement of reinforced concrete columns and floor slabs are presented in Table 3.

Table 3 – Main results of instrumental testing of reinforcement

№	The name of the structure	Determined diameter of the rod of the working armature, mm	Design protective layer of concrete/ regulatory layer, mm	The actual protective layer of concrete, mm	Deviation of the actual value from the design/ normative, mm
1	Columns	Longitudinal working fittings 4Ø16 mm, at the corners of the columns. Transverse reinforcement (clamps) Ø8 mm with a step from 200 mm to 250 mm	-/30	from 20 till 40	-/till 10
2	Floor slabs	Upper and lower reinforcing mesh Ø12 mm, with a step of 200 mm. There are sections of floor slabs with additional upper (over the supports Ø14mm, Ø16mm) and lower reinforcement (in spans Ø14mm)	-/20	from 10 till 40	-/ from 10 till 20

According to the research results and determination of the actual strength of concrete and reinforcement of columns, floor slabs, calculations of the main load-bearing structures of the building were carried out to establish their residual load-bearing capacity and suitability for normal operation – taking into account the defects and damages, wear and tear identified during the inspection, the requirements of the regulatory documents in force at the time of the inspection, as well as the loads.

The calculation of the load-bearing structures was performed using the calculation complex PC "LIRA-SAPR". Verification calculations of the structures were carried out for two groups of limit states: I – for load-bearing capacity; II – for suitability for normal operation. Calculation for the first group was carried out to prevent failure (strength calculation), loss of stability (calculation for longitudinal bending, overturning). Calculation for the second group of limit states was carried out to prevent excessive deformations (deflections, angular rotations), the appearance of cracks, limitation of crack width in concrete, etc. Verification calculations were performed in a linear setting. The following conditions were taken into account in the calculations of the structures:

- actual stress-strain state of the structures;
- the need and possibility of partial dismantling, strengthening of damaged load-bearing structures of columns, floor slabs.
- establishment of the possibility of safe operation of the building.

Quantitative characteristics of the calculation scheme.

The calculation scheme (model of existing structures) is characterized by the following

parameters:

- number of nodes – 49647;
- number of finite elements – 53080;
- number of unknowns – 234736;
- number of loads – 8;
- number of load combinations – 21;
- number of modes of eigen oscillations (KF) – 8.
- step of triangulation of finite elements is – 0.1 m.

The general view of the calculation scheme is presented in Fig. 6 and Fig. 7.

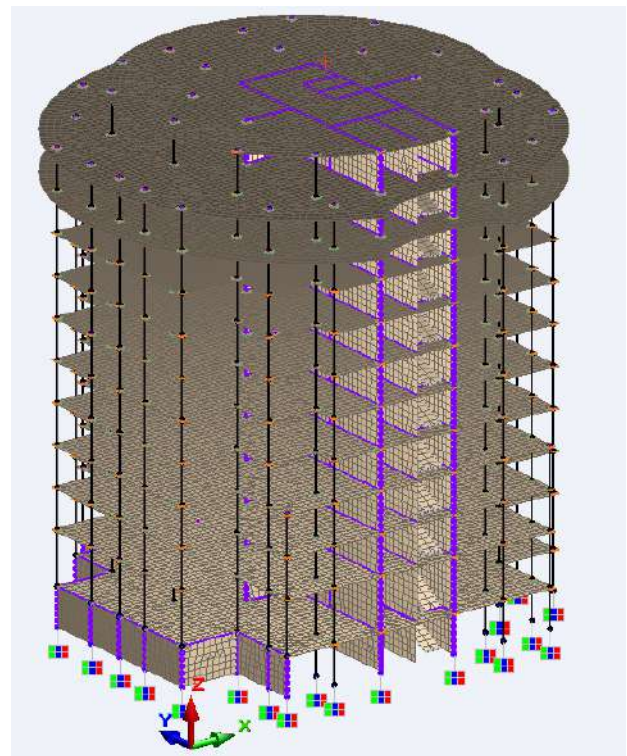
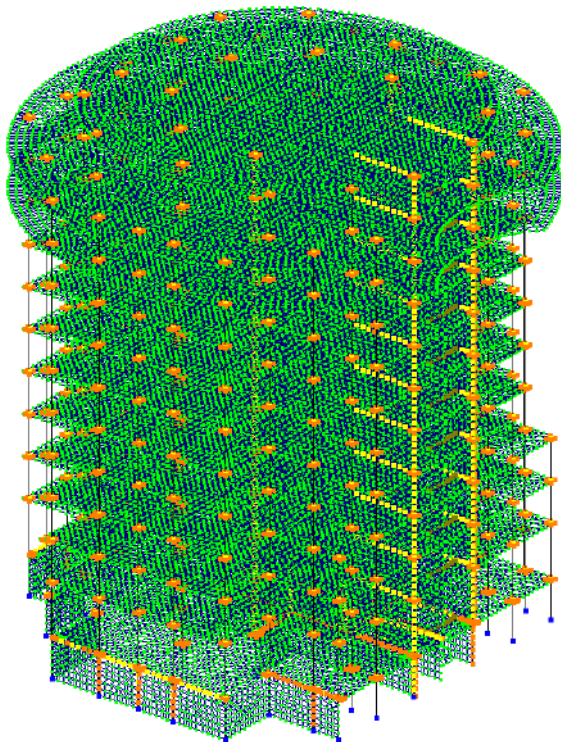


Fig. 6. General view of the settlement scheme

Fig. 7. General view of the settlement scheme

The main results of the calculation of the specified structural elements are presented for the most unfavorable load combinations (ULC) and maximum internal forces (MIF) for three variants of the building's calculation scheme, namely:

Variant №1. Calculation scheme of the building's load-bearing structures without damage.

Variant №2. Calculation scheme of the building's load-bearing structures with identified and modeled main damages of load-bearing structures.

Variant №3. Calculation scheme of the building's load-bearing structures with reinforcement of the main load-bearing structures.

Figures 8-13 show the main results of the verification calculations of a building fragment at the location of the largest deformations and damages.

According to the research results, to ensure the reliable and safe operation of the surveyed object, it is necessary to provide for and implement the following measures through design decisions:

1. Dismantling and restoration of roof structures.
2. Dismantling of damaged and destroyed roof ventilation ducts.
3. Demolition and restoration of columns in axes "A, 7" at levels 8 and 9, in axes "B, 7".
4. Demolition and restoration of damaged structures of external walls and lintels.
5. Complete dismantling of damaged partition structures.
6. Demolition and restoration of damaged finishes of internal staircases in axes "C-D, 7-9".
7. Demolition and restoration of damaged infill structures (windows and doors).

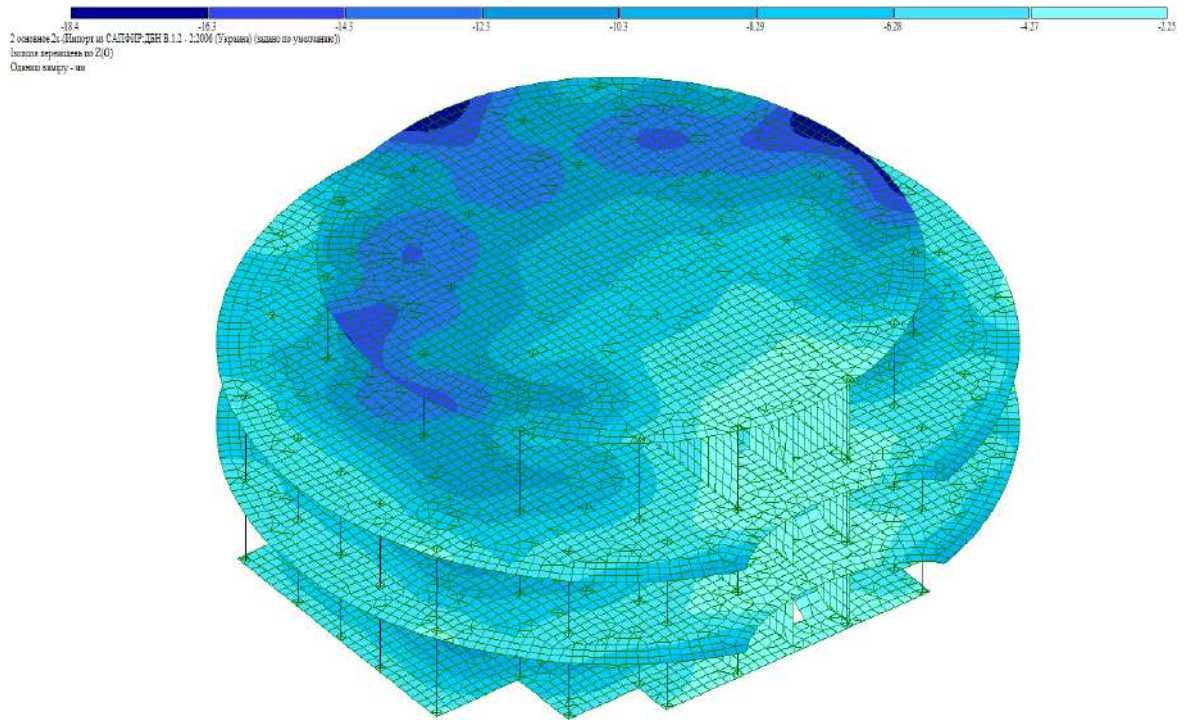


Fig. 8. Mosaic of movements (deflections) of nodes along the Z axis. Option №1.
A fragment of the design scheme of the load-bearing structures of the building without damage.

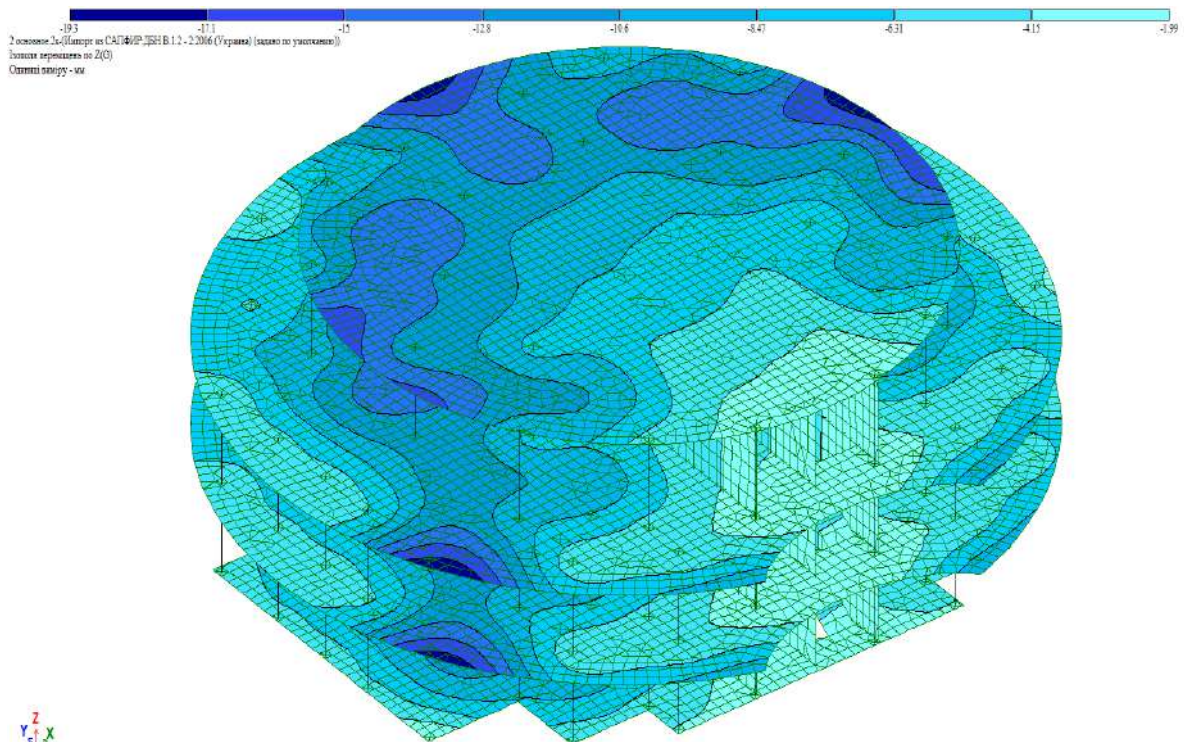


Fig. 9. Mosaic of movements (deflections) of nodes along the Z axis. Option №2.
A fragment of the calculation diagram of the building's load-bearing structures with identified and simulated main damage of the load-bearing structures

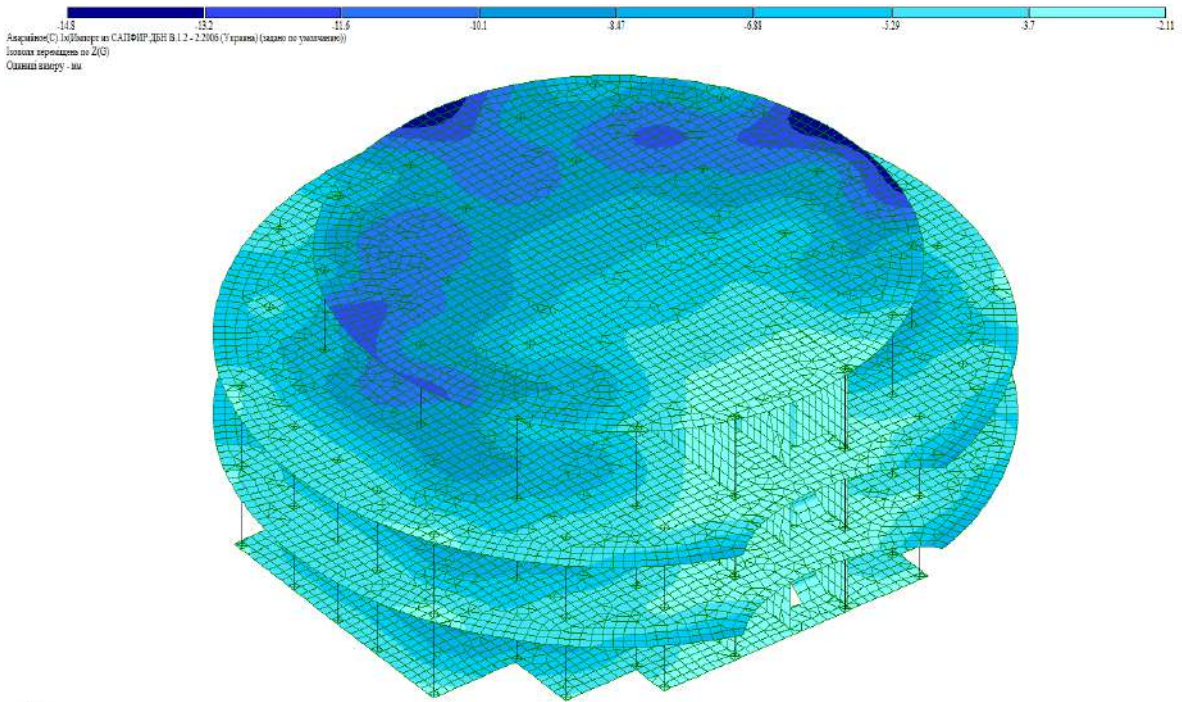


Fig. 10. Mosaic of movements (deflections) of nodes along the Z axis. Option №3.
 A fragment of the design scheme of the load-bearing structures of the building with reinforcement of the main load-bearing structures

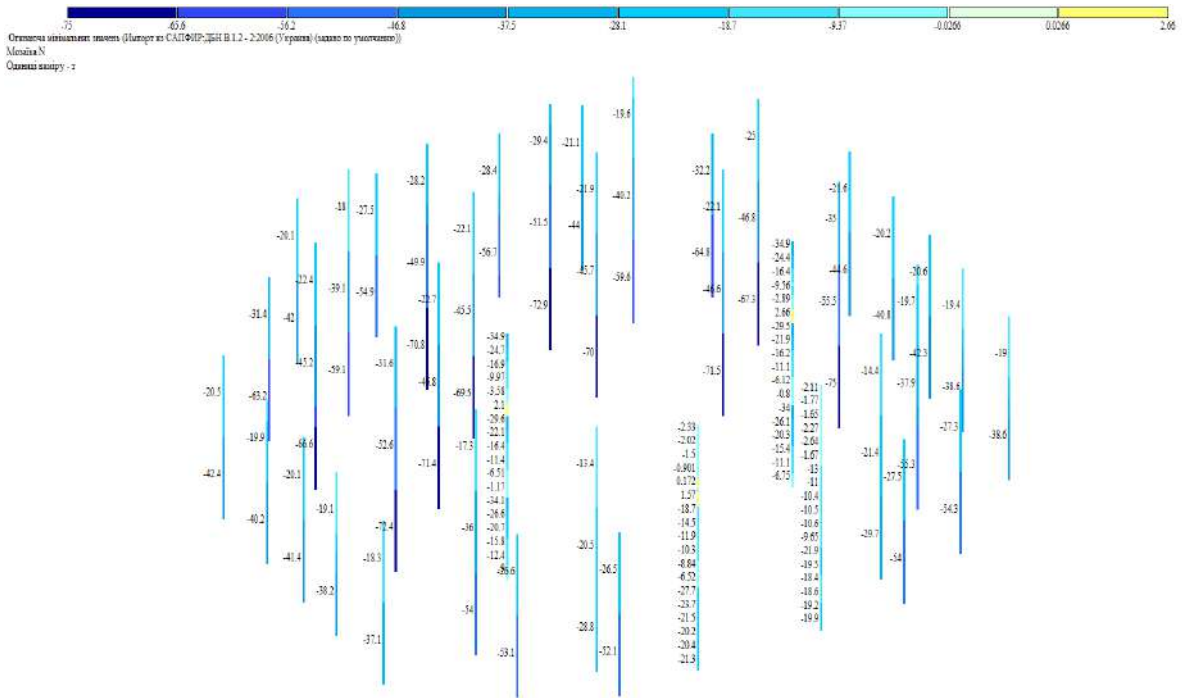


Fig. 11. Mosaic of internal longitudinal forces N. Option №1.
 A fragment of the design scheme of the load-bearing structures of the building without damage

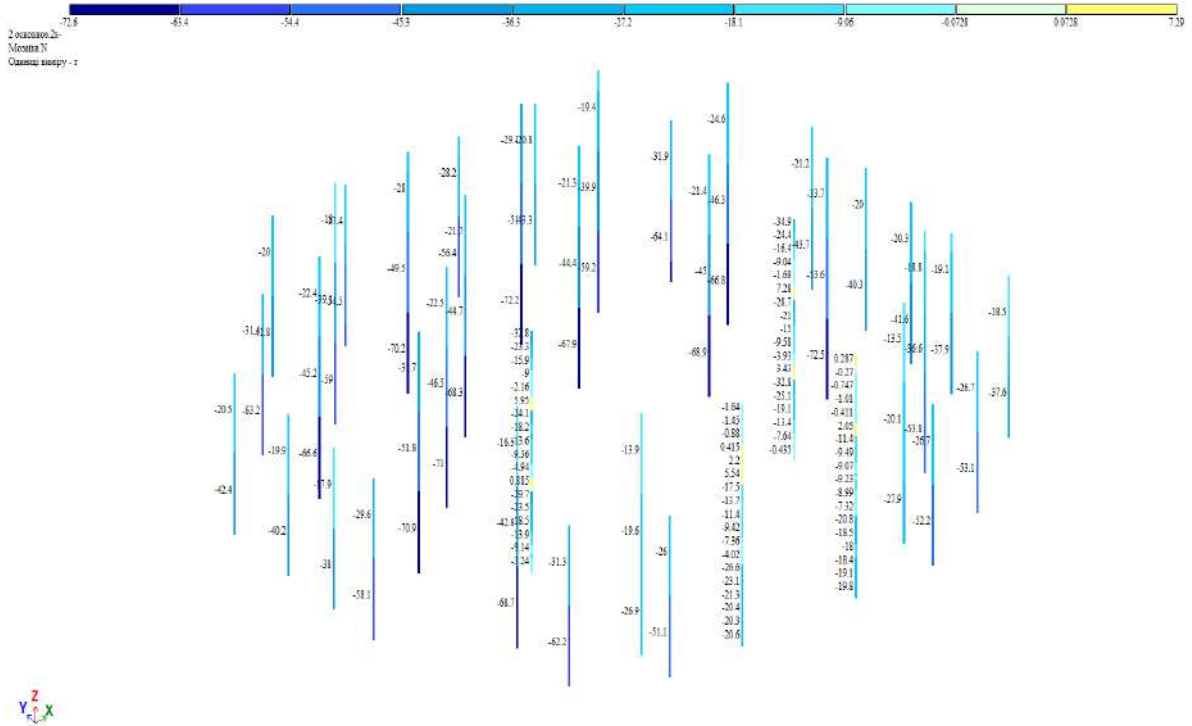


Fig. 12. Mosaic of internal longitudinal forces N. Option №2.
A fragment of the calculation diagram of the building's load-bearing structures with identified and simulated main damage of the load-bearing structures.

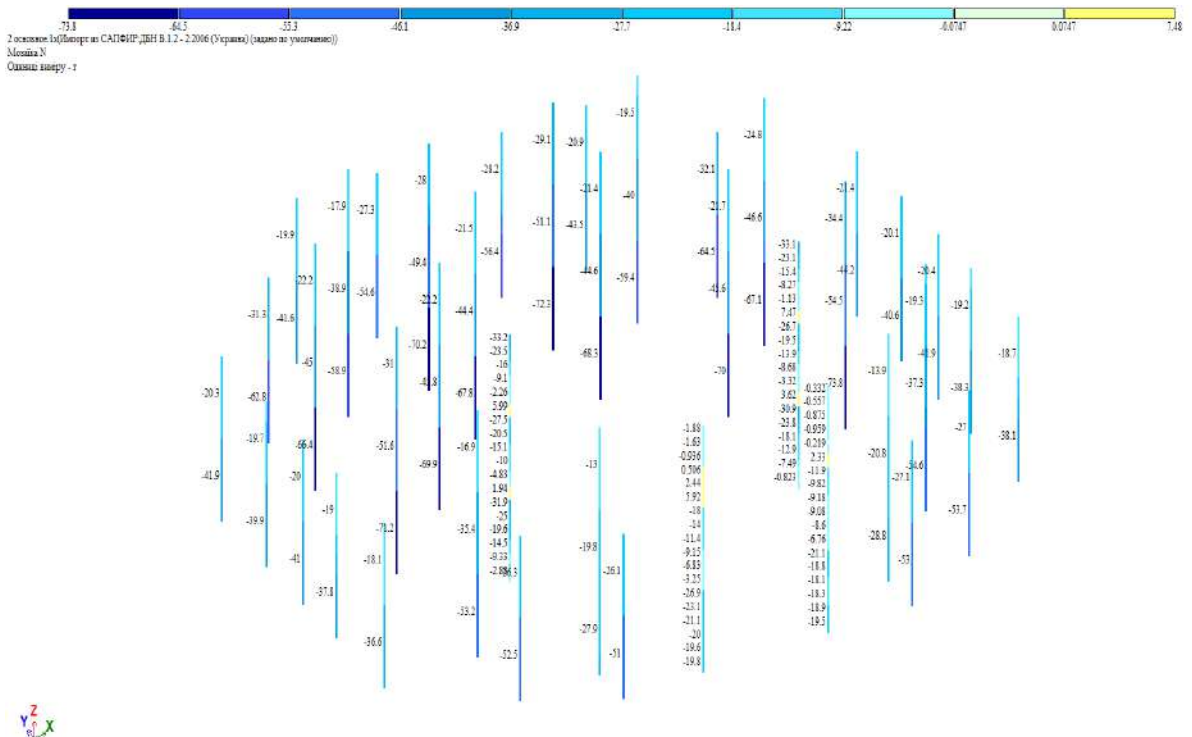


Fig. 13. Mosaic of internal longitudinal forces N. Option №3.
A fragment of the design scheme of the load-bearing structures of the building with reinforcement of the main load-bearing structures

- 8. Demolition and replacement of damaged floor structures.
- 9. Demolition and restoration of damaged interior finishes.
- 10. Demolition and restoration of damaged engineering networks and systems of water supply, sewage, water disposal, heating, ventilation, power supply, fire safety systems, video surveillance,

and low-current systems. Checking the tightness and integrity of systems.

11. Partial dismantling of column and slab structures must be accompanied by simultaneous restoration and reinforcement of adjacent load-bearing structures to redistribute loads and prevent progressive collapse.

12. Partial dismantling of external walls and infill must be accompanied by simultaneous restoration or conservation of structures to prevent the influence of atmospheric precipitation on the existing building structures.

13. Dismantling of load-bearing structures of columns, slabs, and walls without subsequent reinforcement and restoration of structures according to design decisions is prohibited.

14. It is recommended to consider the conservation of damaged and destroyed load-bearing and enclosing structures in accordance with the "Regulation on the Procedure for Conservation and Decommissioning of Construction Objects No. 246 (z1278-16)" dated 02.09.2016.

15. Strengthening of columns at levels 7, 8, 9, and 10 must be carried out.

16. Reinforcement of slab structures above the 7th, 8th, and 9th floors must be carried out.

17. Strengthening of floor sections with cracks wider than 0.5 mm.

18. Installation of monitoring for cracks in slab structures above the 4th, 5th, and 6th floors. In case of cracks wider than 0.3-0.4mm, reinforcement must be carried out.

19. Fastening of AAC external walls to load-bearing structures of the building and fastening of facing ceramic bricks.

20. When restoring wall and partition structures, use lightweight materials for load-bearing and enclosing structures.

21. Exclude additional non-standard loads on existing structures.

22. Do not increase loads on existing load-bearing structures of the building without their prior reinforcement.

23. It is recommended to install monthly geodetic monitoring for the condition of load-bearing brick walls and the dynamics of deformation joint opening according to DBN V.1.3-2-2010 "Geodetic Works in Construction".

24. It is recommended to establish long-term monitoring for the dynamics of existing vertical, inclined, and horizontal cracks in load-bearing structures of columns and slabs.

25. In damaged structures with deformations, installation of mechanical or electronic "beacons" on cracks with mandatory regular monitoring of their condition is necessary. The recommended measurement accuracy is up to 0.1 mm.

26. Until the completion of measures to restore the condition of structures to the level preceding the damage, the operation of the object is not recommended due to the possible collapse of emergency structures. It is recommended to carry out preliminary work to prevent dangerous structural collapse. Install temporary fastening systems to prevent spontaneous collapse, unload load-bearing structures, and reduce existing loads. Perform a complex of anti-accident works.

Conclusions. Research and recording of the actual stress-strain state of damaged structures are the first and crucial stage in determining the building restoration algorithm. For a complete and high-quality study, it is necessary to perform a complex of works to identify and fix damages, determine the strength of materials, reinforcement parameters, and conduct spatial verification calculations of the building as a whole. The absence of a complex of works or improper investigation of damaged buildings usually leads to poor execution of design and estimate documentation for the restoration of structures or even to building collapse. A promising direction in researching the actual state of damaged buildings is 3-D scanning, which allows for building an actual spatial model of the building and reducing the risks of errors in research, design, and building restoration. Considering the analysis conducted, further reconstruction plans include the use of fiberglass mesh.

References

- [1] ISO 7162:1992. Performance standards in construction. Content and format of performance evaluation standards; ISO: Geneva, Switzerland, 1992.

- [2] ISO 19208:2016. Fundamentals of determining the characteristics of buildings; ISO: Geneva, Switzerland, 2016.
- [3] ISO 15686-2:2012. Buildings and constructed assets. Service life planning. Part 2: Service life prediction procedures; ISO: Geneva, Switzerland, 2012.
- [4] A. Silva, J. de Brito, Pedro L. Gaspar, *Methodologies for service life prediction of buildings*, Springer International Publishing, 2016.
- [5] L. Ortega, B. Serrano, J. Fran, "Proposed method of estimating the service life of building envelopes", *Rev. Constr.*, 14, pp. 60–68, 2015.
- [6] Procedure for Urgent Measures to Eliminate the Consequences of Armed Aggression of the Russian Federation Related to the Damage of Buildings and Structures (Cabinet of Ministers Resolution dated April 19, 2022, No. 473).
- [7] Procedure for the Inspection of Commissioned Construction Facilities in Terms of Conducting Preliminary and General Inspections to the Required Extent with the Preparation of a Technical Report. Cabinet of Ministers of Ukraine Resolution dated April 12, 2017, No. 257.
- [8] Methodology for Inspection and Documentation of its Results. Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine Order No. 144 dated August 6, 2022.
- [9] Procedure for Demolition Works on Objects Damaged or Destroyed as a Result of Emergencies, Hostilities, or Terrorist Acts (Cabinet of Ministers Resolution dated April 19, 2022, No. 474).
- [10] R. Khmil, Z. Blikharsky, P. Vegera, N. Kopiika, "Bearing capacity of reinforced concrete beams with and without damages of rebar", *Production Engineering Archives*, 29(3), pp. 298-303, 2023.
- [11] Y. Faten, A. Mashrei, M. Oleiwi, "Numerical analysis of corrosion reinforcements in fibrous concrete beams", *Civil and Environmental Engineering*, 17(1), pp. 259-269, 2024. <https://doi.org/10.2478/cee-2021-0027>
- [12] J. Selejdak, T. Bobalo, Y. Blikharsky, I. Dankevych, "Mathematical modelling of stress-strain state of steel-concrete beams with combined reinforcement", *Production Engineering Archives*. 29(1), pp. 108-115, 2023. <https://doi.org/10.30657/pea.2023.29.13>
- [13] M. Surianinov, S. Neutov, V. Yesvandzhyia, "Bearing capacity of a beam damaged during combat actions strengthened with the use of fiber concrete", *Spatial development*, 5, pp. 212-222, 2023. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.5.212-222>
- [14] Ye. Klymenko, R. Hlibotskyi, "Modeling of stress-strain state and strength of damaged concrete beams reinforced with carbon fiber fabric in PC "LIRA-SAPR", *Modern construction and architecture*, 7, pp. 73-82, 2024. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-7-73-82>
- [15] Ye. Klymenko, O. Maksyiuta, I. GrynyovaI, Ž. Kos, "Principles of modeling the work of damaged columns made of compressed reinforced concrete", *Conference: International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv - Košice – Rzeszów*, 2023, pp. 178-186. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_19
- [16] M. Surianinov, O. Chuchmai, O. Shyliaiev, "Numerical and analytical boundary element method application in ribbed slab analysis", *Tehnicki glasnik-Technical journal*, 9 (4), pp. 432-436, 2015. <https://hrcak.srce.hr/149761>
- [17] L. Kormošová, J. Halvonik, "Behavior of the experimental flat slab specimen supported by an elongated column", *Solid State Phenomena*, 322(5), pp. 87-93, 2024. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.322.87>
- [18] L. Cascini, G. Raffaele, P. Francesco, "LiABlock_3D: A software tool for collapse mechanism analysis of historic masonry structures", *International Journal of Architectural Heritage*, 14(1), pp. 75-94, 2020. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1509155>
- [19] Ja. Halvoník, A. Vidaković, V. Borzovič, "Failure analysis of collapsed parking garage building due to punching, Engineering", *Failure Analysis*, 129, 105712, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105712>
- [20] A. Kramarchuk, B. Ilnytsky, O. Lytvyniak, "Features of elimination of the emergency technical state of the steel bearing roof constructions of the industrial building", *AIP Conf.*

Proc., 2684 (1), 030020, 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0120031>

- [21] Ia. Onescu, A. Lo Monaco, M. Fofiu et al., "Vulnerability Assessment of Historical Churches in Banat Seismic Region, Romania", *Structural Analysis of Historical Constructions*, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39450-8_93
- [22] T. Friis, E. I. Katsanos, M. Saberi, H. Holger, H. Koss, "Two-level friction damping and its application for passive multi-functional vibration control of high-rise buildings", *Engineering Structures*, 239, 112310, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112310>

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ, ПОШКОДЖЕНИХ НАДЗВИЧАЙНИМИ СИТУАЦІЯМИ

¹Кушнір О.М., к.т.н., доцент,
amkushnir@odaba.edu.ua, ORCID: 0009-0004-4305-1796

¹Кушнір В.О., асистент,
vak2705@odaba.edu.ua, ORCID: 0009-0009-1891-2845

¹Гриньова І.І., к.т.н., доцент,
grynyova@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7637-6029

¹Бічев І.К., к.т.н., доцент,
bichev@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3000-2600

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

Анотація. Стаття присвячена дослідженню напружено-деформованого стану будівельних конструкцій, пошкоджених у результаті надзвичайної ситуації, що сталася через ракетний удар по будівлі в м. Одесі. Мета роботи полягала у всебічному аналізі технічного стану пошкодженої споруди, оцінці впливу удару на несучу здатність і деформаційні характеристики конструкцій, а також розробці рекомендацій з їх відновлення. Автори провели детальне інструментальне обстеження з використанням неруйнівних методів контролю, топографо-геодезичні виміри для визначення вертикальності конструкцій, а також виконали верифікаційні розрахунки з використанням програмного комплексу «ЛІРА-САПР». Було встановлено значні пошкодження колон, плит перекриття та зовнішніх стін, що несуть загрозу прогресуючого руйнування будівлі. Конструкції оцінено як аварійні, зі ступенем пошкоджень до 80%. Запропоновані заходи включають демонтаж та відновлення пошкоджених елементів, посилення несучих конструкцій металевими елементами, встановлення тимчасових підсилюючих конструкцій та постійний моніторинг технічного стану споруди. Особливу увагу приділено визначенню фактичної міцності бетону, що відповідає класу С20/25 (В25). Також було досліджено параметри армування, такі як діаметр і захисний шар робочої арматури колон та плит перекриття. Встановлено, що реальні значення захисного шару бетону мали відхилення від нормативних значень, що потребує врахування при плануванні заходів з відновлення та посилення конструкцій. Дослідження підтвердило необхідність комплексного підходу до аналізу пошкоджених будівель, що включає в себе сучасні методи, такі як 3D-сканування, для створення точних просторових моделей та мінімізації помилок у проектуванні і відновленні. Отримані результати дозволяють підвищити ефективність проектних рішень для реконструкції будівель, постраждалих внаслідок надзвичайних ситуацій, а також можуть бути використані для розробки більш ефективних підходів до оцінки стану та експлуатаційної надійності будівельних конструкцій в аналогічних випадках.

Ключові слова: експертиза, дефекти, руйнування, реставрація, неруйнівні методи.

Стаття надійшла до редакції 9.04.2025

This work © 2025 by Kushnir O., Kushnir V., Grynyova I., Bichev I. is licensed under CC BY 4.0

**ВПЛИВ УМОВ СПИРАННЯ СТРУКТУРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ
НА ХАРАКТЕР ЇЇ РОБОТИ**

¹Циганенко Л.А., к.т.н, доцент,
liudmyla.tsyhanenko@snau.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6628-3635

¹Срібняк Н.М., к.т.н, доцент,
nataliia.sribniak@snau.edu.ua, ORCID: 000-0003-3205-433X

¹Циганенко Г.М., старший викладач,
tsyganenkogm@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3335-4804

¹Галушка С.А., старший викладач,
galushka_sa@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2789-8570

¹Волков Д.Г., старший викладач,
volkovvdg@gmail.com, ORCID: 0009-0008-9263-4102

¹Сумський національний аграрний університет
вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40000, Україна

Анотація. На підставі аналізу публікацій та досліджень щодо використання в якості перекриття металевих просторових ґратчастих структурних покриттів встановлено, що цей тип конструкцій є найбільш раціональним та характеризуються ефективною статичною поведінкою та своєю працездатністю. Проте, на напружено-деформований стан структурної конструкції можуть впливати певні фактори: від форми структурної ґратки, умови спирання та кількість опор до висоти структурної плити та характеру прикладання зусиль. Ці всі фактори впливають на кінцевий результат підбору перерізів несучих елементів та остаточне конструктивне рішення конструкції. Як підсумок можна стверджувати, що дослідження одного з цих факторів (регуляторів зусиль), який впливає на підбор перерізів несучих елементів і як наслідок на загальну матеріаломісткість конструкції, є актуальним. За основу регулятора зусиль в схемах скінчено-елементних моделей структурних покриттів в ПК ЛІРА-САПР було прийнято спосіб та кількість розташування елементів спирання конструкції, а саме колон. Розташування колон приймається за трьома схемами: колони розташовані по чотирьом кутівим опорам нижнього поясу; колони розташовані вздовж вздовж нижнього поясу з кроком 3 м та 6 м по двом паралельним сторонам конструкції; чотири опори, що зміщені всередину плити на 4,5 м з обох боків. Варіанти розташування опор були використані для визначення найбільш ефективної схеми з точки зору статичної поведінки конструкції і, як наслідок, найменш матеріалоємної. Ефективність визначалася за критерієм раціонального напружено- деформованого стану. Проводився підбір перерізів елементів за першою та другою групами граничних станів. Визначалась вага конструкцій за схемами з урахуванням підбору перерізів з максимальним використанням за умовами міцності та стійкості. Визначено, що за критерієм матеріалоємності ефективною є схема №3, що спирається на 4 колони, зміщені всередину плити на 4,5 м.

Ключові слова: статична робота, скінчено-елементна модель, розташування колон, міцність та стійкість, напружено-деформований стан, критерій матеріалоємності.

Вступ. Структурні конструкції – це просторові конструкції, що дозволяють перекривати великі прольоти та відповідно площі без проміжних опор, з певними вимогами та допущеннями до з'єднання їх конструктивних елементів та способу прикладання навантажень [1].

Характерною ознакою цих конструкцій є те, що вони можуть мати як двошарову так і багатошарову решітку з певною регулярністю та мінімальною варіацією розмірів поперечного перерізу несучих елементів, які формують кристалічну піраміду структури – так званий базовий елемент структурної конструкції. Кристалічна піраміда формується системою похилих, вертикальних і горизонтальних стержнів порядок яких нагадує кристали природного

походження, такі як графіт і алмаз. Фактично, об'єднуючи просторові стержні для забезпечення їх геометричної незмінності в піраміди, що мають квадратну, трикутну або шестикутну основу можна змодельовати базовий елемент структури з *тетраедру, пентаедру, гептаедру* (рис. 1) [2].

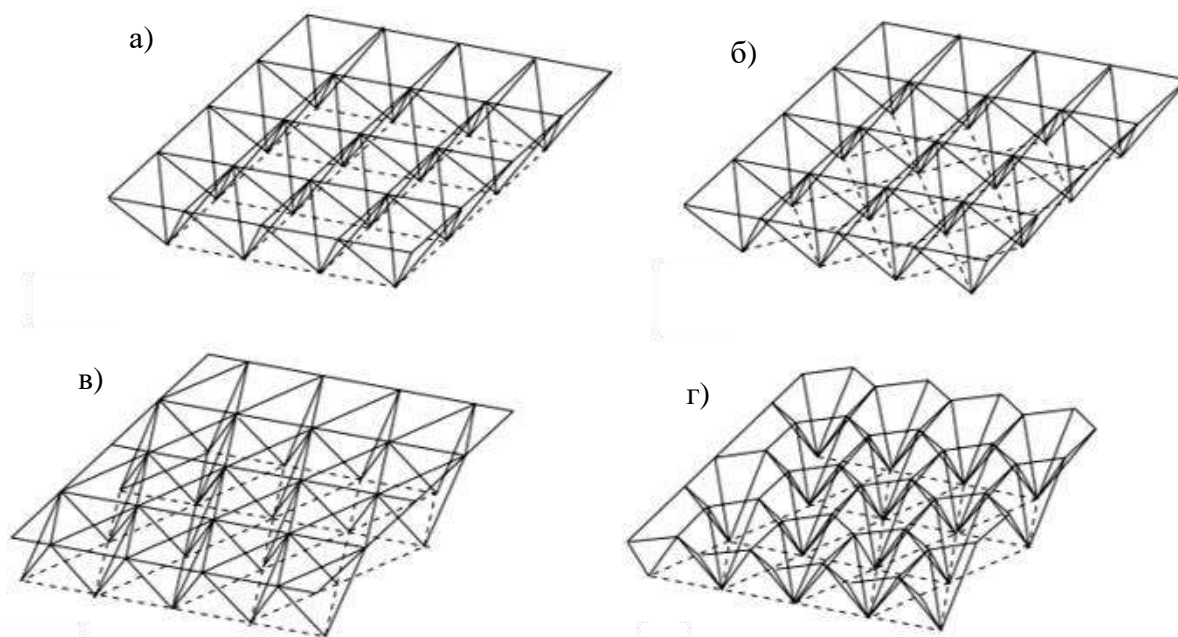


Рис. 1. Структурні піраміди на основі:
а, б – пентаедрів; в – тетраедрів; г – гептаедрів

Світовий досвід втілення структурних конструкцій має приклади унікальних споруд громадського та промислового призначення. Перша просторова структура була розроблена у 1907 році Олександром Грем Беллом з базової одинці чотиригранної форми. Перше комерційне використання структурних конструкцій започаткував Макс Менгерінгхаузен – німецький винахідник системи Mero у 1943 року. А коли відомий футурист Бакмінстер Фуллер у 1954 році винайшов геодезичні куполи та отримав свій перший патент на розробку їх конфігурації, створивши таким чином поштовх до розробки криволінійних структурних покриттів.

Французький дизайнер Стефан дю Шато у 1959 році розробив модульну систему Unibat, що складалася з пірамідальних елементів із квадратною, трикутною або шестикутною основою. Його системи Tridirectionelle SDC (1957), Pyramitec (1960) та Tridimatec (1965) відрізнялись в першу чергу системою з'єднувальних елементів та формою несучих профілів.

Розвиток та удосконалення з'єднань елементів структурних пірамід сприяло виникненню унікальних будівель та споруд світового рівня. Поряд з традиційними геометричними формами просторових покриттів, наразі існує велика кількість їх футуристичних форм, що можна побачити в таких будівлях як аеропорт Станстед і вежа Банку Китаю, просторова структура Культурного центру Гейдара Алієва в Баку [3].

Складність металевих просторових структурних конструкцій та їх з'єднань, питання геометричної незмінності та роботи сталі в пластичному граничному стані було питанням ґрунтовних аналітичних та експериментальних досліджень такими фахівцями як: Хейман (1952, 1953), Стівенс (1961, 1968), Хонгладарамп та ін. (1968), Григорян (1971, 1972, 1973), Сак і Хеккі (1971), Саплм і Коллінз (1981), Парк і Вокер (1984), Шмідт (2000), Кавехом і Талатахарі (2009), Гойзаде тощо. (2012).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Те, що при проектуванні структурних конструкцій виникає низка питань, що пов'язані з конструктивним рішенням, які в подальшому впливають на напружено-деформований стан елементів звертали увагу ряд

дослідників. Конструктивні рішення таких конструкцій потребують особливої уваги підходу та технічних рішень [4]. Тривалий термін проектування структурних конструкцій показав, що одне з головних питань при виборі їх конструктивної форми пов'язане в першу чергу з їх економічною ефективністю. Як показано у [5] вибір конструктивного рішення металевої структури є оптимізаційним завданням, оскільки матеріалоемність конструкції є одним з найважливіших показників її ефективності.

Автори [6] провели дослідження експлуатаційних характеристик довгопрогонових сталевих просторових конструкцій у порівнянні з плоскими системами і показали, що вага конструкції є визначальним фактором при остаточному виборі конструктивного рішення.

В роботі [7] автор дослідив зміну напружено-деформованого стану у двохшаровій ґратці структурної конструкції. Автор зробив висновок, що форма піраміди, кількість опорних систем та їх розташування значно впливають на розподіл зусиль в елементах і відповідно на вибір їх профілю. Автор показав, що регулюванням цих показників можна змінити економічну складову самої конструкції.

Залежність статичної поведінки від форми структурної піраміди наведено в [8]. Формоутворення та оптимізація для структурних конструкцій довільної форми, що підтримуються колонами, на основі оновленого методу густини сил наведені в [9]. В роботі [10, 11] показано, що спосіб розташування опорних систем (колон), створення попереднього напруження в елементах нижнього поясу, форма піраміди суттєво впливає на напружено-деформований стан стержнів структурної конструкції.

Проведені дослідження авторів [12-14] акцентують на те, що основною вимогою є відповідність конструкції критеріям міцності та жорсткості з одночасним показником мінімальної матеріалоемності при виконанні вищезазначених умов.

Автором в роботі [15] показана методика вибору оптимального конструктивного рішення сталевих просторових ферм при варіантному проектуванні з урахуванням конструктивних, технологічних, економічних і експлуатаційних вимог. Авторами в роботі [16] доведено вплив таких факторів як: місце розташування опор, наявність підтримуючої залізобетонної плити верхнього поясу структури на згин двохшарової структурної конструкції. На основі експериментальних досліджень було зроблено висновок, що наявність залізобетонної плити на верхньому поясі структури сприяє підвищенню міцності і жорсткості не тільки самого верхнього поясу але й запобігає руйнуванню всієї конструкції. Варіативне дослідження із застосуванням чисельних методів дає змогу шляхом послідовного перебору варіантів обрати конструкцію з оптимальними параметрами. Визначення найефективнішого рішення за критерієм мінімальної ваги (тобто за матеріаломісткістю) є одним із головних завдань на початкових стадіях проектування. При оптимізації структурної конструкції потрібно враховувати не лише показники її матеріаломісткості, а й витрати праці на її виготовлення, транспортування та монтаж, оскільки сукупність цих чинників впливає на кінцеву її вартість. Важливою перевагою структурних конструкцій є можливість проектування перерізів елементів таким чином, щоб максимально використовувати їх несучу здатність, що напряму сприяє економії сталі й зниженню загальної вартості конструкції.

Мета та завдання. Питання оптимізації конструктивного рішення металевих конструкцій, особливо просторових покриттів, без проміжних опор є актуальним, враховуючі тенденцію використання великопролітних полегшених конструкцій в цивільному будівництві. Метою досліджень є розуміння оптимізаційного шляху та напрямку, що дозволить отримати конструктивну схему працездатного просторового структурного покриття. Для вирішення цього питання проведемо варіативні дослідження конструктивних рішень структурного покриття найефективніше числовим методом в ПК ЛІРА-САПР, що реалізує метод скінчених елементів.

Матеріали та методика дослідження. Проведення варіативного дослідження конструктивного рішення структурного покриття найефективніше проводити числовим методом.

Числовий метод аналізу будівельних конструкцій (метод скінчених елементів) є одним з методів будівельної механіки, що реалізований в програмному комплексі ЛІРА-САПР. Цей

метод полягає в дискретизації розрахункової схеми конструкції скінчено-елементною моделлю з певними допущеннями при моделюванні умови спирання та вузлового з'єднання елементів між собою [17]. В ПК ЛІРА-САПР закладено методику проєктування груп конструктивних елементів в модулі “Сталеві конструкції” в основі якого реалізовано основні положення будівельних норм [18].

В даному модулі розрахункові положення [18] дозволяють провести підбір профілів поперечних перерізів для всіх груп елементів конструкції відповідно до сформованих РСН або РСЗ за результатами статичного аналізу елементів скінчено-елементної схеми відповідно до вимог першої та другої груп граничних станів. Також даний модуль дозволяє отримати показники несучої здатності підібраних або заданих проєктувальником у першому розрахунковому наближенні перерізів.

Результати досліджень. Дослідженню підлягає двошарова структура з розмірами 30,0×30,0 м у плані верхнього поясу та 27,0×27,0 м у плані нижнього поясу (рис. 2) з ортогональною ґраткою, що має розмір 3,0×3,0 м, рис. 2. Висота конструкції (товщина плити) – 3,0 м.

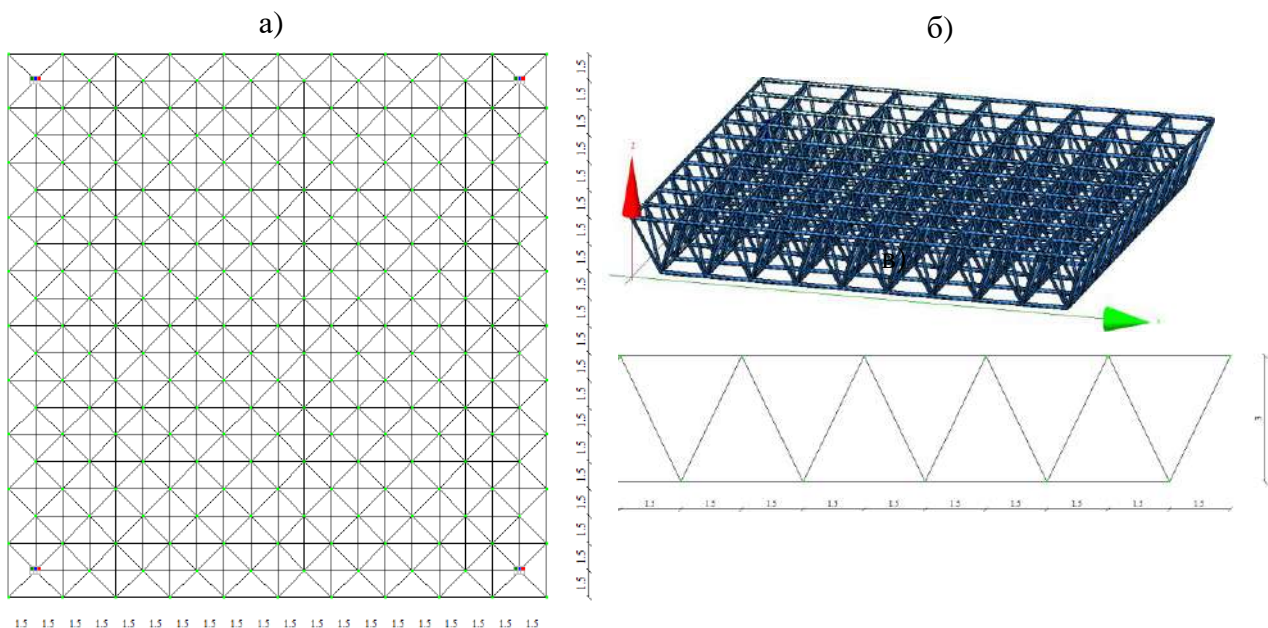


Рис. 2. Скінчено-елементна модель:

а – вид у площині XOY; б – модель 3D; в – фрагментний вид у площині XOZ

Розглянемо три умови спирання структурного покриття (рис. 3):

- для схеми № 1 відстань між колонами прийнято 27 м;
- для схеми № 2 відстань між колонами прийнято 6 м та 3 м;
- для схеми № 3 відстань між колонами прийнято 18 м.

Вихідними даними для моделювання схем було прийнято, що стержні структурного покриття прийняті з профільних електрозварних прямошовних труб для верхнього і нижнього поясів 245×30 мм, для стержнів ґратки 168×30 мм, для стержнів, що моделюють колони прийнято переріз 273×40 мм.

Діючими навантаженнями було прийнято постійні та тимчасові, а саме: власна вага елементів структури, що визначається в ПК ЛІРА-САПР автоматично; вага покриття, прийнята у вигляді зосередженої сили, що прикладена до вузлів верхнього поясу; змінне снігове навантаження для другого кліматичного району України – 1,87 кН/м² [19]. Змінне вітрове навантаження не було змодельоване, враховуючі те, що дія його впливу на виникнення внутрішніх зусиль приблизно становить 1 %, що можна вважати несуттєвим.

Для аналізу зміни напружено-деформованого стану елементів структурного покриття приймаємо умови, що початкова геометрія схем конструкцій, спосіб прикладання та діючі навантаження є постійними незмінними параметрами в усіх схемах. Змінним параметром є умови спирання що прийняті у схемах, а саме: кількість опор та їх розташування.

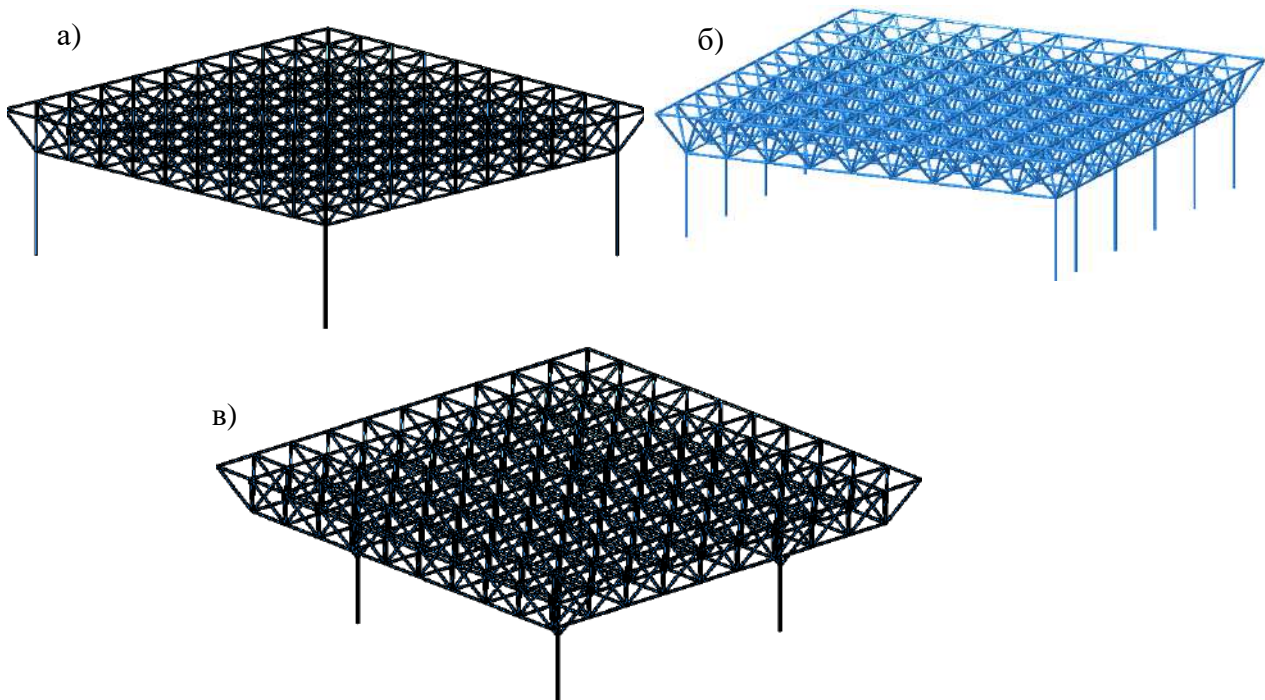


Рис. 3. Умови спирання структурного покриття: а – схема № 1 (чотири кутових опори нижнього поясу); б – схема № 2 (спирання вздовж нижнього поясу з кроком 3 м та 6 м); в – схема № 3 (чотири опори, що зміщені всередину плити на 4,5 м)

Отримані величини зусиль в елементах структури обмежені умовою міцності: для стержнів що працюють на розтяг і умовою міцності та стійкості для стержнів, що працюють на стиск.

Показники максимальних прогинів обмежені показниками граничного прогину [20].

Предметом дослідження є зміна роботи структурного покриття в залежності від розташування опор. Характер роботи опори структури визначає поведінку конструкції. Наприклад, при спиранні конструкції на чотири колони, що розташовані по опорним кутам, конструкція буде працювати в обох напрямках (площини XOZ і YOZ).

Рівність параметрів напружено-деформованого стану також обумовлена квадратною формою просторової сітки конструкції в плані. Чим більше форма плити в плані наближена до прямокутника, тобто чим більша різниця у співвідношенні сторін, тим більш нерівномірним буде перерозподіл осевих зусиль в стержнях її поясів у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Результати дослідження. Зміна умов спирання структурної конструкції відображається в різних деформованих схемах конструкцій (рис. 4).

Простежується не лише зміна величини максимального прогину а й характер прогинів, а саме: наявність вузлів що отримали так зване позитивне переміщення – схема № 1 це вузли, що належать опорним кутовим вузлам, схема № 2 це вузли, що належать опорним поясам вздовж колон, схема № 3 має тільки від'ємне значення прогинів.

Враховуючи симетричність отриманих переміщень, приведемо гістограму (рис. 5) прогинів вузлів для половини першого приопорного блоку.

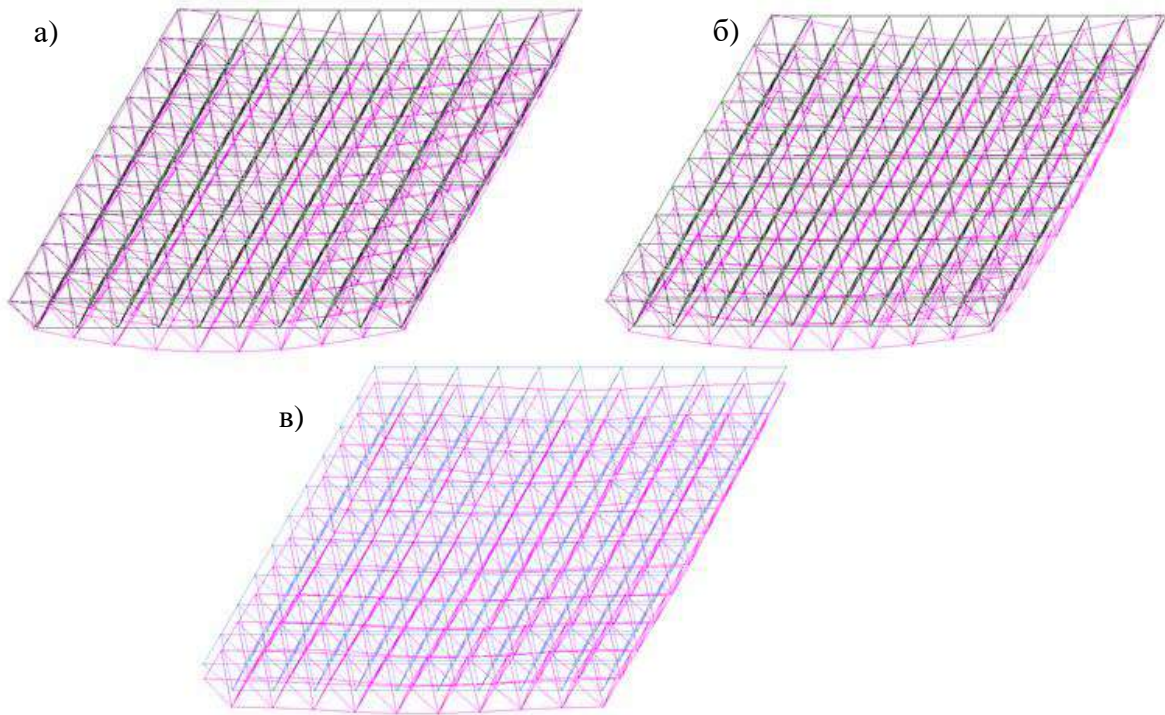


Рис. 4. Вихідні та деформовані схеми структурного покриття:
а – схема № 1; б – схема № 2; в – схема № 3

На рис. 5 наведено гістограму вертикальних переміщень вузлів у середній частині нижнього поясу, де f_z – це вертикальне переміщення вузлів вдовж осі Z .

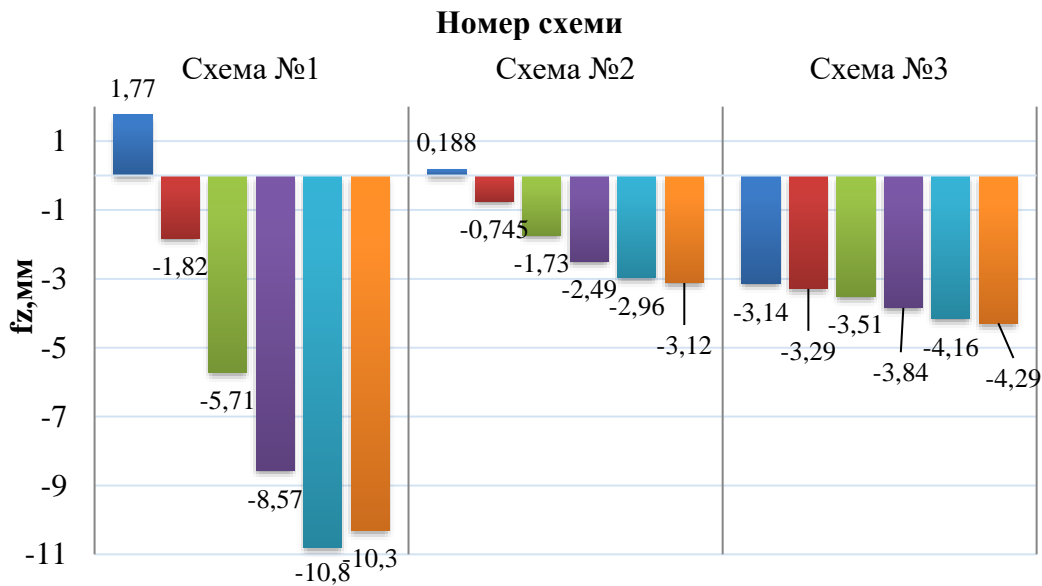


Рис. 5. Гістограма переміщень вузлів (половина блоку)

Отримані максимальні значення переміщень, що належать центральній частині конструкції для схем №1 та №2 порівнюємо з максимально допустимим прогином відповідно до [20] за формулою:

$$f = \frac{1}{250} = \frac{27000}{250} = 108\text{мм.} \quad (1)$$

$$\text{Для схеми №3 за формулою: } f = \frac{1}{250} = \frac{18000}{250} = 72\text{мм.} \quad (2)$$

На рис. 6 показані значення максимального переміщення вузлів для трьох схем структурного покриття.

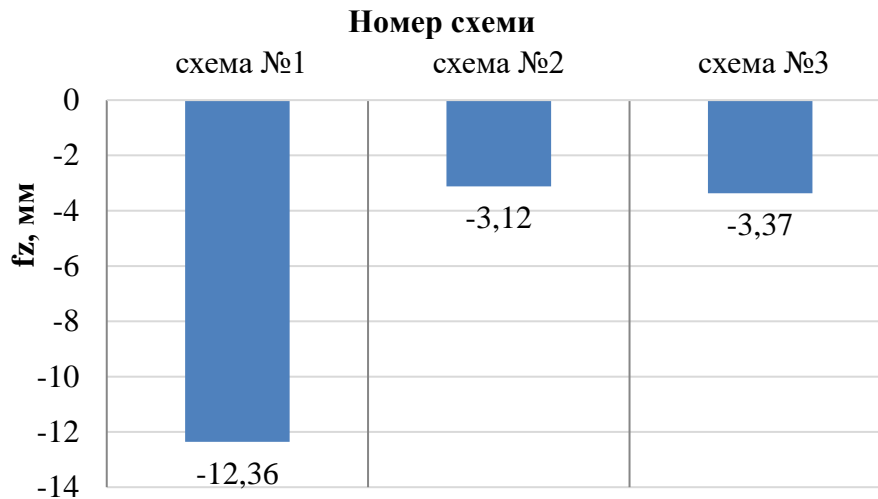


Рис. 6. Максимальні значення прогинів f_z в схемах

Різниця в деформованих схемах структурних покриттів обумовлює різницю напруженого стану їх елементів.

У табл. 1 показані максимальні повздовжні зусилля N в усіх групах конструкцій стержнів.

Таблиця 1 – Максимальні зусилля N в елементах конструкції за схемами

Назва конструктивної групи стержнів	Схема №1	Схема №2	Схема №3
Верхній пояс	-57,9	-19,36	-13,7
	1,33	1,93	13,6
Нижній пояс	0	-1,19	-6,23
	74,9	23,7	13,9
Розкоси	-38,6	-9,13	-20,2
	34	6,7	11,12

Для оцінки різниці між визначеними величинами зусиль за схемами приведемо в табл. 2 різницю їх величин у відсотках, це дозволить наочно зрозуміти тенденцію збільшення або зменшення. Знак «+» показує збільшення величини зусилля у % від зусилля в схемі № 1, знак «-» показує зменшення величини зусилля у %.

Таблиця 2 – Порівняння різниці у величинах зусилля N в елементах конструкції за схемами

Назва конструктивної групи стержнів	Різниця у % між схемою №1 та №2	Різниця у % між схемою №1 та №3	Різниця у % між схемою №2 та №3
Верхній пояс	-66,5	-76	-29,2
	-31,08	+90	+85
Нижній пояс	+1,19	+6,23	+80,9
	-68,3	- 81,4	-41,3
Розкоси	-76	-47,6	+54,8
	-80,3	-67,3	+39,7

В табл. 3 приведено максимальні величини зусиль в колонах та відмінності у % за схемами.

Таблиця 3 – Максимальні зусилля в елементах колонах за схемами

Зусилля	Схема №1	Схема №2	Схема №3
N, т	-96,1	-22,02	-139
M _y , тм	±1,84	±1,25	±0,09
M _z , тм	±1,84	±0,02	±0,09
N, т, різниця у % зусиль між схемами	зусилля зменшилися на 77%		
		зусилля зросли 84,15 %	

У табл. 4 наведено % використання несучої здатності перерізу різними групами стержневих елементів для трьох схем структурної конструкції після першого ітераційного статичного аналізу.

Аналіз табл. 4 доводить, що всі елементи структурної ґратки значно недонапружені.

Таблиця 4 – Використання (%) несучої здатності перерізу для груп стержнів плит після першого ітераційного аналізу

Назва елементу	% використаного перерізу		
	Схема №1	Схема №2	Схема №3
Верхній пояс	12,5	3,9	2,8
Нижній пояс	16,1	4,8	2,9
Розкоси	15	3,5	5,7
Колона	26	10	22

Незначний відсоток використання несучої здатності попередньо прийнятих перерізів свідчить про значний запас за міцністю та стійкістю в усіх схемах. Фактичний рівень напружень обумовив виникнення лише пружних деформацій, тому подалі розглядається робота елементів в пружній постановці.

Використовуючи підмодуль проектування металоконструкцій в ЛІРА-САПР було проведено підбір перерізів стержнів для усіх розрахункових груп відповідно до вимог міцності, стійкості та жорсткості. Результати розрахунку приведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Підібрані перерізи елементів схем

Номер схеми	Поперечний переріз (профільна труба), за схемою № 1 Сталь С 235	Поперечний переріз, підібраний за допомогою підпрограми ЛІРА-САПР на основі результатів статичного аналізу	
		Номер типу перерізу	Профіль труби, мм
Верхній пояс			
1	245×30	46	76×5,5
2	245×30	52	60×3
3	245×30	24	45×3
Нижній пояс			
1	245×30	24	76×5,5
2	245×30	24	73×4
3	245×30	12	50×3
Розкоси			
1	168×30	69	68×5,5
2	168×30	89	63,5×3,5
3	168×30	39	57×3,5
Колони			
1	273×40	47	273×8
2	273×40	55	146×4,5
3	273×40	13	146×16

У табл. 6 наведено нові перерізи елементів та розрахункові ваги верхніх, нижніх поясів, розкосів і колон для всіх схем ґратки структури.

Таблиця 6 – Показники ваги елементів для верхнього поясу

Номер схеми	Номер елемента	Профіль	Вага 1 м.п. профілю, т	Довжина стержнів, м	Вага, т
Верхній пояс					
1	46	76×5,5	0,00955	660	6,303
2	52	60×3	0,004575	660	3,019
3	24	45×3	0,003106	660	2,049
Нижній пояс					
1	24	76×5,5	0,00955	594,00	5,67
2	24	73×4	0,006804	594,00	4,04
3	12	50×3	0,003476	594,00	2,06
Розкоси					
1	69	68×5,5	0,008474	1468	12,44
2	89	63,5×3,5	0,005177	1468	7,60
3	39	57×3,5	0,004616	1468	6,78

В табл. 7 окремо приведемо величину ваги перерізів, що моделюють колони структури з урахуванням їх кількості у схемі.

Таблиця 7 – Показники ваги елементів, що моделюють колони

Номер схеми	Номер елемента	Профіль	Вага 1 м.п. профілю, т	Вага одного елемента, т	Кількість елементів у схемі, шт	Загальна вага, т
1	47	273×8	0,05542	0,41	4	1,64
2	55	146×4,5	0,0157	0,12	12	1,40
3	13	146×16	0,05124	0,23	4	0,91

Загальна вага структур за схемами з урахуванням ваги колон, на які вони спираються розрахована в табл. 8.

Таблиця 8 – Показники загальної ваги конструкції

Номер схеми	Вага конструктивної плити, т	Вага елементів колон, т	Загальна вага, т	Різниця у вазі між схемою №1 та №2, схемою №2 та №3, %	
1	24,41	1,64	26,05	62,23%	36,1%
2	14,66	1,40	16,06		
3	10,89	0,91	11,80		

На рис. 7 показано гістограму загальної ваги моделей, включаючи вагу колон. З рис. 7 та табл. 8 видно, що вага конструкції за першою схемою (спирання структури на чотири кутові колони) на 62,23 % більша при порівнянні зі схемою № 2 (спирання структури на ряд колон по довгій стороні). При чому, порівняння схеми № 1 та схеми № 3 показує, що зміщення з контурної зони в середню на 4,5 м та встановлення розкосів між стержнем колони і площиною нижнього поясу, зменшує вагу структурної конструкції на 120,8 %.

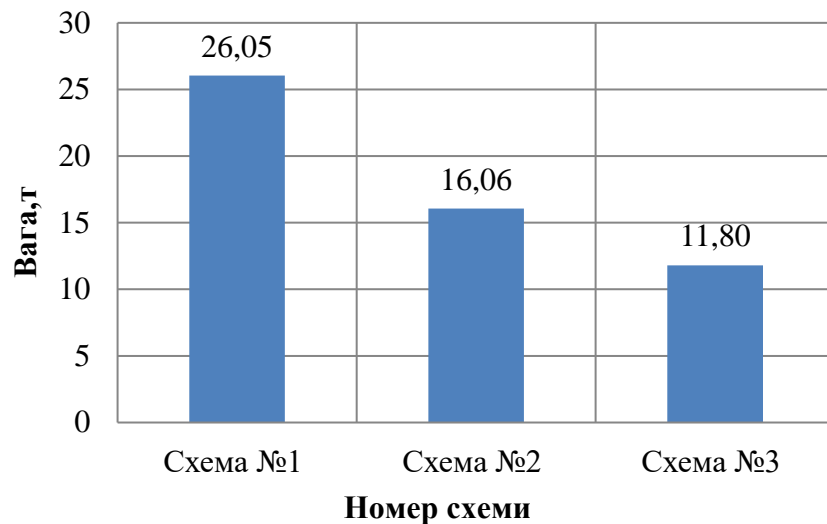


Рис. 7. Загальна вага конструкцій за схемами

Точність та достовірність результатів моделювання структурних конструкцій в ПК ЛІРА-САПР обумовлюється коректною побудовою скінчено-елементної схеми, аналізом статичної роботи уніфікованих груп стержнів (верхній пояс, нижній пояс, елементи решітки) та читанням результатів зусиль. Відповідно до результатів досліджень [11, 15, 16] в схемах структур, що були змодельовані елементи верхнього поясу працюють на стиск, елементи нижнього поясу – на розтяг, елементи решітки знаходяться під дією змінної осьової сили. За характером розподілу повздовжнього зусилля в стержнях верхнього і нижнього поясів ґратки структури його величини мають близькі за величиною значення, що відповідає правилам поведінки просторової решітчастої системи під дією рівномірно розподіленого навантаження.

За результатами статичного розрахунку, що проводився в пружній стадії роботи матеріалу, аналізувався напружено-деформований стан елементів схем за прийнятими перерізами, проводилась перевірка прийнятих та підбір нових перерізів. Підбір перерізів враховував граничну гнучкість елементів та вертикальні переміщення всієї конструкції. Адекватність розрахункового вибору перерізів груп елементів обумовлювалась вимогами та обмеженнями [19, 20], що повинні бути враховані при заданні жорсткості та параметрів матеріалів. Обмеженнями є виконання умови міцності для розтягнутих стержнів та стійкості для стиснутих стержнів, обмеженням за граничним прогином конструкції, є його максимально допустима величина. Для верхнього та нижнього поясів, розкосів були призначені типи конструктивної групи – як елемент фермової решітки; для колон – як елемент колони.

Коефіцієнт надійності за відповідальністю будівель прийнятий як 1,0. Коефіцієнт розрахункової довжини для колон у двох площинах був такий, що дорівнює 0,6; значення граничної гнучкості прийнято в межах 180-60α [18].

Висновки:

1. Структурна конструкція – це конструктивна система, яка суттєво реагує на зміну певних параметрів, які впливають на напружено-деформований стан елементів її ґратки. Ці впливи називають силовими регуляторами. В даному дослідженні в якості регуляторів зусиль було використовувано спосіб розташування колон, на які спиралась структурна конструкція.

2. Зміна умов спірання конструкції вплинула на показники жорсткості. За виникаючими прогинами найменш жорсткою є схема № 1. Схема № 2 деформується як плита, що оперта по двом сторонам (спірання по довжині на шість опор з кожного боку) з прогином 3,12 мм, що менше на 74,75 % у порівнянні зі схемою №1. Схема № 3 має максимальну величину прогину 3,37 мм що на 7,4 % більше у порівнянні зі схемою № 2. Але в усіх схемах максимальні величини прогинів не перевищують максимально допустимого значення – 108 мм.

3. Зміна умов спираання вплинула на показники міцності та стійкості елементів структури. При порівнянні схем №1 та №2 максимальна зміна торкнулась розкосів конструкції – зусилля впали на 76 % та 80 % відповідно. При порівнянні схем № 2 та № 3 максимальна зміна торкнулась нижнього та верхнього поясів – різниця між зусиллями складає 85% та 80,9 % відповідно. Відповідно, результати перевірки міцності попередньо прийнятих перерізів стержнів показали, що стержні структури в усіх схемах працюють зі значним недонапруженням (табл. 4).

4. Зміна умов спираання структури обумовила зміну величини зусиль та характеру роботи елементів, на які спирається структура. Так простежується зменшення зусиль в опорних елементах при порівнянні схем № 1 та № 2 – на 77 % (колони працюють на стиск з вигином), та збільшення на 30 % у порівнянні схем № 1 та № 3 (колони працюють на центральний стиск).

5. Підібрані перерізи стержнів структури за умовою міцності, стійкості та жорсткості, дозволили оцінити вагу кожної структурної схеми просторової конструкції (рис. 7). За критерієм матеріалоємності найбільш ефективним конструктивним рішенням є структура за схемою №3, що спирається на 4 колони, зміщені всередину плити на 4,5 м.

Перспективи подальших досліджень. Враховуючі отримані результати за схемою №3 доцільно провести дослідження зміни напружено-деформованого стану (НДС) елементів структурного покриття в залежності від умов закріплення зміщених опор та висоти підтримуючих стоек від колон до самого покриття для отримання закономірностей їх впливу на НДС всієї системи.

З цією метою для більш детального та оптимального проєктування необхідно провести декілька ітераційних розрахунків для визначення та підбору елементів з максимально повним використанням площі поперечного перерізу з урахуванням умов міцності та стійкості, що може дозволити суттєво зменшити вагу плити, при незначному збільшенні кількості типорозмірів профілів стержнів у структурних групах стержнів.

Також доцільно провести в ПК ЛІРА-САПР розрахунок схеми структури з урахуванням її геометричної змінності.

Література

1. Basil B., Lakshmi B.S., et al. Space truss design using STADD. Pro Software. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2019. Vol. 6, Issue 4. С. 3777–3782. URL: <https://www.irjet.net/archives/V6/i4/IRJET-V6I41180.pdf> (date of access: 06.05.2025).
2. Chilton J. *Space Grid Structures*. Routledge. 2007. <https://doi.org/10.4324/9780080498188>.
3. Cabo A. D. Evolution and Trends in Design. Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures. *International Journal of Space Structures*. 2009. SAGE Publications. <https://doi.org/10.1260/026635109788251449>.
4. Машков І. Л., Скребнева С. М., Баранецька Д. С., Глушаниця А. І. Аналіз ефективності роботи елементів просторового покриття. *Теорія та практика дизайну: зб. наук. праць. Архітектура та будівництво*. 2023. Вип. 27. С. 63–68. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2023.27.8>.
5. Ashtull S. A., Patil S. N. Review on Study of Space Frame Structure System. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2020. Vol. 7, Issue 4. P. 667–672. <https://www.irjet.net/archives/V7/i4/IRJET-V7I4137.pdf>
6. Patel B., Jamani A. Parametric Study of Different Structural Systems for Long Span Industrial Structures. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 4, Issue 4. P. 2164–2167. <https://www.irjet.net/archives/V4/i4/IRJET-V4I4452.pdf>
7. Madi U. R. An investigation into the design parameters of double layer space frame grid. *Space Structure*. 1987. P. 215–222.
8. Setareh M., Bacim F., Polys N., Jones B. Development of the Web-Based Structure and Form Analysis System (SAFAS) for Architectural Education. *Journal of Architectural Engineering*. 2015. Vol. 21, № 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000179](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000179).

9. Zhao D., Zhang Yu, T., Gao H. Form-finding and optimization for free form grid structures supported by branching columns based on updated force density method. *Structures*. 2022. Vol. 44. P. 1190–1203. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.063>.
10. Sribniak N. та ін. Напружено-деформований стан структурної плити. *ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2020. № 2 (55). С. 35–43. <https://doi.org/10.26906/znp.2020.55.2339>.
11. Tsyhanenko L. та ін. Determining the optimal size of the basic element in a space grid structure. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*. 2023. Vol. 12. No. 2023.12. P. 201–208. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.22>.
12. Білик О. С. Сталь у реконструкції будівель : монографія. Київ : Український центр сталевих будівництва, 2016. 167 с.
13. Facilitator C. Space Frame Structure; an analysis of its benefit. *Constro Facilitator*. URL: <https://constrofacilitator.com/space-frame-structure-an-analysis-of-its-benefit> (дата звернення: 06.05.2025).
14. Білик А. С. Оптимальний вибір конструкцій з дискретно змінною схемою навантаження. *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського*. Вип. 14. С. 70–78. 2014.
15. Білик А. Вибір оптимальних конструктивних рішень сталевих кроквяних ферм : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук; Київський нац. ун-т буд-ва і архітектури. Київ, 2009. 20 с
16. Lakshmikandhan K. N., Senthil R., Jayachandran A. S., Sivakumar P., Ravichandran R. Parametric Studies on the Behavior of Steel and Composite Space Structures. *International Journal of Space Structures*. 2009. Vol. 25(3). P. 169–183. DOI: 10.1260/0266-3511.25.3.169.
17. Розрахунок та проектування конструкцій. LiraLand : веб-сайт. URL: <https://www.liraland.ua> (дата звернення: 06.05.2025).
18. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі Зміною № 1. На заміну ДСТУ Б В.2.6-194:2013 та ДБН В.2.6-163:2010 у частині розділу 1 ; чинний від 2015-01-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2014. 199 с. URL: https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=58106 (дата звернення: 16.04.2024).
19. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування : на заміну СНІП 2.01.07-85 ; чинний від 01 січ. 2007 р. : [офіц. вид.]. Мінбуд України. Київ : Мінбуд України, 2006. 14 с.
20. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження та впливи : чинні від 01 січ. 2007 р. : [офіц. вид.] / Мінрегіонбуд України. Київ : Мінрегіонбуд України, 2006. 96 с.

References

- [1] B. Basil, B.S. Lakshmi, et al., "Space truss design using STADD. Pro Software", *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 6, Issue 4, pp. 3777-3782, 2019. [Online]. Available: <https://www.irjet.net/archives/V6/i4/IRJET-V6I41180.pdf>. Accessed on: May 06, 2025.
- [2] J. Chilton, *Space Grid Structures*. Routledge, 2007. <https://doi.org/10.4324/9780080498188>.
- [3] A.D. Cabo, "Evolution and Trends in Design. Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures", *International Journal of Space Structures*. 2009. SAGE Publications. <https://doi.org/10.1260/026635109788251449>.
- [4] I.L. Mashkov, S.M. Skrebnieva, D.S. Baranetska, A.I. Hlushanitsia, "Analiz efektyvnosti roboty elementiv prostorovoho pokryttia", *Teoriia ta praktyka dyzainu: zbirnyk naukovykh prats. Arkhitektura ta budivnytstvo*, Issue 27, pp. 63–68, 2023. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2023.27.8>.

- [5] S.A. Ashtull, S.N. Patil, "Review on Study of Space Frame Structure System", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 7, Issue 4, pp. 667–672, 2020. <https://www.irjet.net/archives/V7/i4/IRJET-V7I4137.pdf>
- [6] B. Patel, A. Jamani, "Parametric Study of Different Structural Systems for Long Span Industrial Structures", *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, Issue 4, pp. 2164–2167, 2017. <https://www.irjet.net/archives/V4/i4/IRJET-V4I4452.pdf>
- [7] U. R. Madi, "An investigation into the design parameters of double layer space frame grids. Space Structure" *Sage Journals*, vol. 27, Issue 4, pp. 215–222, 1987.
- [8] M. Setareh, F. Bacim, N. Polys, B. Jones, "Development of the Web-Based Structure and Form Analysis System (SAFAS) for Architectural Education", *Journal of Architectural Engineering*, vol. 21, no. 3, 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000179](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000179)
- [9] D. Zhao, Yu.T. Zhang, H. Gao, "Form-finding and optimization for free form grid structures supported by branching columns based on updated force density method", *Structures*, vol. 44, pp. 1190–1203, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.063>
- [10] N. Sribniak, et al, "Napruzhenno-deformovanyi stan strukturnoi plyty", *Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*, no. 2 (55), pp. 35–43, 2020. <https://doi.org/10.26906/znp.2020.55.2339>
- [11] L. Tsyhanenko, et al. "Vyznachennia optymalnoho rozmiru bazovoho elementa u prostorovii stryzhnevii konstruktsii", *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, vol. 12, no. 2023.12, pp. 201–208, 2023. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.22>.
- [12] O.S. Bilyk, *Stal u rekonstruktsii budivel: monohrafiia*. Kyiv: Ukrainyskyi tsentr stalevoho budivnytstva, 2016.
- [13] C. Facilitator, "Space Frame Structure; an analysis of its benefit", *Constro Facilitator*. [Online]. Available: <https://constrofacilitator.com/space-frame-structure-an-analysis-of-its-benefit>. Accessed on: May 06, 2025.
- [14] A.S. Bilyk, "Optymalnyi vybir konstruktsii z dyskretno zminnoiu skhemoiu navantazhennia", *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho instytutu stalevykh konstruktsii imeni V. M. Shymanovskoho*, Issue 14, pp. 70–78, 2014.
- [15] A. Bilyk, "Vybir optymalnykh konstruktyvnykh rishen stalevykh krokviannykh ferm", avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk. Kyiv: Kyivskyi nats. un-t budivnytstva i arkhitektury, 2009.
- [16] K.N. Lakshmikandhan, R. Senthil, A.S. Jayachandran, P. Sivakumar, R. Ravichandran, "Parametric Studies on the Behavior of Steel and Composite Space Structures", *International Journal of Space Structures*, vol. 25(3), pp. 169–183, 2009. DOI: 10.1260/0266-3511.25.3.169.
- [17] Rozrakhunok ta proektuvannia konstruktsii, LiraLand : web-site. [Online]. Available: <https://www.liraland.ua>. Accessed on: May 06, 2025.
- [18] DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia. Zi Zminoiu № 1. Na zaminu DSTU B V.2.6-194:2013 ta DBN V.2.6-163:2010 u chastyni rozdil 1; chynnyi vid 2015-01-01. Vyd. ofits. K: Minrehion Ukrainy, 2014. [Online]. Available: https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=58106. Accessed on: April 16, 2025.
- [19] DSTU B V.1.2-3:2006. Prohyny i peremishchennia. Vymohy proektuvannia. Na zaminu SNyP 2.01.07-85; chynnyi vid 2007-01-01. Vyd. ofits. K: Minbud Ukrainy, 2006
- [20] DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennia ta vplyvy, chynnyi vid 01.01.2007. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2006.

INFLUENCE OF ARRANGEMENT OF COLUMNS OF A SPACE GRID STRUCTURE ON ITS BEHAVIOR

¹**Tsyhanenko L.A.**, PhD., Associate Professor,
liudmyla.tsyhanenko@snau.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6628-3635

¹**Sribniak N.M.**, PhD., Associate Professor,
natalia.sribniak@snau.edu.ua, ORCID: 000-0003-3205-433X

¹**Tsyhanenko G.M.**, senior lecturer,
tsyhanenkogm@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3335-4804

¹**Halushka S.A.**, senior lecturer,
galushka_sa@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2789-8570

¹**Volkov D.G.**, senior lecturer,
volkovvdg@gmail.com, ORCID: 0009-0008-9263-4102

¹*Sumy National Agrarian University*
160 Gerasyma Kondratyeva str., Sumy, 40000, Ukraine

Abstract. Based on the analysis of publications and studies on the use of metal spatial lattice structural coatings as a slab, it has been established that this type of structure is the most rational and is characterised by effective static behaviour and its performance. However, the stress-strain state of a structural structure can be influenced by certain factors: from the shape of the structural grid, the bearing conditions and the number of supports to the height of the structural slab and the nature of the forces applied. All these factors influence the final result of the selection of load-bearing element cross-sections and the final structural design. As a result, it can be argued that the study of one of these factors (force regulators), which affects the selection of cross-sections of load-bearing elements and, as a result, the overall material consumption of the structure, is relevant. The basis of the force regulator in the schemes of finite element models of structural coatings in LIRA-SAPR software was based on the method and number of arrangement of structural support elements, namely columns. The arrangement of the columns is accepted according to three options: columns located along the four corner supports of the lower belt; columns located along the lower belt with a step of 3 m and 6 m on two parallel sides of the structure; four supports shifted inside the structure by 4.5 m on both sides. The options for the location of the supports were used to determine the most efficient arrangement in terms of the static behaviour of the structure and, as a result, the least material-intensive. The efficiency was determined by the criterion of the rational stress-strain state. The cross-sections of the elements were selected according to the first and second groups of limit states. The weight of the structures was determined according to the schemes, taking into account the selection of cross-sections with maximum use according to the conditions of strength and stability. It was determined that, according to the material consumption criterion, model No. 3, based on 4 columns shifted inside the slab by 4.5 m, is effective.

Keywords: static behaviour of the structure, finite element model, column arrangement, strength and stability, stress-strain state, material consumption criterion.

Стаття надійшла до редакції 7.05.2025

This work © 2025 by Tsyhanenko L.A., Sribniak N.M., Tsyhanenko G.M., Halushka S.A., Volkov D.G. is licensed under CC BY 4.0

HOW DO COMPOSITE MATERIAL PROPERTIES CHANGE WITH ONE OF THEM UNCHANGED?

¹**Lyashenko T.V.**, D.Sc., Professor,
frabul16@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6232-4866

¹**Kersh V.Ya.**, Ph.D., Professor,
vkersh@hotmail.com, ORCID: 0000-0001-6085-5260

¹**Antoniuk N.R.**, Ph.D., Associate Professor,
antonuk_nr@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1730-0723

¹**Khlytsov N.V.**, Ph.D., Associate Professor,
khlytsov@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0003-3486-6833

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

Abstract. A few words about the history and importance of composite materials, dispersed systems with multicomponent dispersion medium and dispersed phase, in the progress of civilization are in the beginning of the paper. This and the methodology of the fields of material properties in the coordinates of composition and process factors, described by experimental-statistical (ES) models, underlie the research presented in this paper. One of the main tools of the methodology is random scanning of "composition-process" fields of material properties. The aim of the work is to show how this tool allows to evaluate the change in properties if one of them should be unchanged, using the examples of solving two tasks in the study of lightweight gypsum concrete, with cenospheres and perlite as fine aggregates. Microsphere size distribution with average about 0.1 mm and average size of perlite grains about 0.3-0.5 mm could suggest rather compact piling and forming relatively steady skeleton.

ES-models of the dependences of density and compressive and flexural strength on the content of aggregates and dosages of two chemical additives have been used, built on the results of the designed natural experiment, in which property levels were determined for 18 compositions.

In computational experiments the compositions (of filler at fixed average values of admixtures dosages) are generated, and the estimates of their properties by the models allow isoparametric analysis to be performed. In the first example, compositions in which the concrete density level goes beyond the specified boundaries of the isoparametric corridor are excluded from the analysis. Changes in strength are estimated under condition of an approximately constant required density. The strongest compositions under this condition can be assessed. In the second case, the compressive strength must be the required constant. Changes in density and flexural strength under this condition are evaluated based on their levels in compositions remaining in the isoparametric corridor of compressive strength. In this case, the lightest compositions of a given strength can be determined. Isoparametric analysis has proven to be quite useful in materials science.

Keywords: experimental-statistical model, isoparametric analysis, lightweight gypsum concrete, cenospheres, perlite, strength, density.

Introduction. Composite materials with natural matrices and reinforcements of local origin have been used since ancient times. The authors of [1] compare the importance of this fact with the discovery of fire and the invention of the wheel. Nowadays, the composites, with a variety of dispersion media and dispersed phases, present the special class of High-Performance Materials (HPM), those that best serve exactly what they are designed for [2-4]. HPM is called one of top achievements of modern civilization.

Building composite materials are complex multicomponent dispersed systems. Nested multicomponentity is characteristic (complex chemical additives, a mixture of three mineral fillers with three grain sizes each). When studying and developing building composites the methodology

of composition-process fields has proved to be effective [5, 6]. It allows the fields of material properties Y (structural, technological, and performance characteristics, criteria of utilization and ecology, any other criteria, including cost) in the coordinates of composition and process factors (CP-factors), vector $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k)$, to be described. Experimental-Statistical models [5], built on the results of designed natural experiment [7, 8], are used as the functions $Y(\mathbf{x})$. They make it possible to extract directly inaccessible information hidden in the data with the help of computational experiments, carrying out the random scanning of the property fields [5, 9, 10]. The individual and combined influence of the factors on Y can be evaluated, the acceptable, optimal and compromise CP-solutions can be estimated. Among the problems that could be solved is the one indicated in this paper title. It is necessary to estimate the changes in $Y(\mathbf{x})$ when the level of one Y must be kept constant. The way to solve the problem is shown below on the base of building material science specific study.

So, **the aim of the study** presented in this paper has been, firstly, to promote the way to solve the problems of keeping one property of material unchanged and of evaluating the variations of others under this condition.

Secondly, to see the changes in the properties of lightweight gypsum concrete, when specified level of one of the properties must be maintained constant.

To solve the problems of this kind V.A. Voznesensky put forward and developed [11] isoparametric analysis (IPA). The procedure was quite complicated. Nowadays, IPA is carried out using computational materials science methods [5, 12]. Many problems have already been solved with the help of IPA. This paper presents another one.

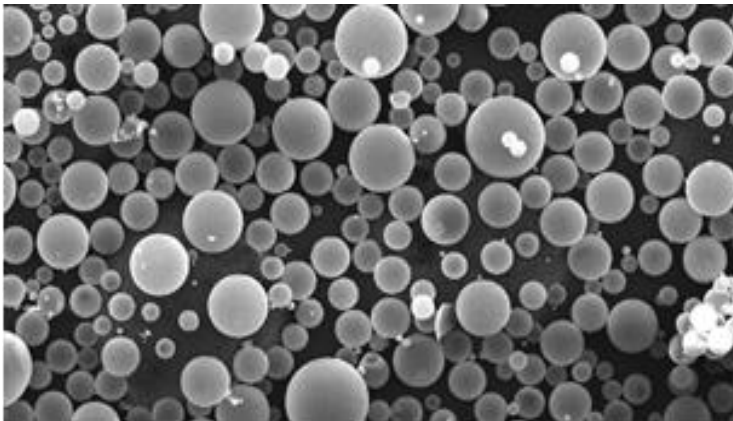


Fig.1 Cenospheres

When developing the lightened gypsum concrete on the base of β -hemihydrate [13] it was suggested that alumina-silica microspheres (cenospheres, Fig. 1) formed as a part of fly ash [14, 15] could replace (totally or partially) water absorbing aggregates, perlite in particular, and reduce the quantity of mixing water and the decrease in strength. The cenospheres have low density and heat conductivity, spherical form, chemical inertness, high hardness and melting temperature [15, 16].

The methods. Two groups of composition factors varied in the designed experiment are shown in Table 1, corresponding to their values being the levels of normalised factors, $|x_i| \leq 1$ (1).

Table 1 –Values of composition factors in the experiment

i	Factor X_i		Levels		
			$x_i = -1$	$x_i = 0$	$x_i = +1$
1	Aggregate factors – quantities (gypsum volume %) of:	cenospheres (CS)	30	50	70
2		perlite (P)	0	15	30
3	Matrix factors – dosages (% of gypsum mass) of:	superplasticiser (SP)	0.3	0.5	0.7
4		air-entraining admixture (AE)	0.2	0.5	0.8

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\Delta X_i}, \quad X_i = x_i \cdot \Delta X_i + X_{0i} \quad (1)$$

where x_i – is normalised value of the i^{th} factor, X_i – natural value, X_{0i} – center of variation range, ΔX – half range (variation interval).

Microsphere size distribution with average about 0.1 mm and average size of perlite grains about 0.3-0.5 mm could suggest rather compact piling and forming relatively steady skeleton.

The factor ranges have been chosen basing on preceding trials. In particular, the lower limit of CS is conditioned by revealed growth of strength when introducing up to 20-30% of cenospheres. The required amount of water for each β -hemihydrate based composition provided mix spread of 18 cm (at glass table).

Material property levels measured according to Ukrainian standards were determined for 18 compositions, corresponding to the points of the synthesized 4-factor D-optimal design of the 2nd order [7, 17, 18]. Density ρ (kg/m³), compression and bending strength f_{cm} and $f_{c.tf}$ (MPa), and heat conductivity λ (W/m/K) were among the properties.

The data obtained have made it possible the fields of material properties in four composition coordinates (of vector \mathbf{x}) to be described by non-linear 4-factor experimental-statistical models like (2) and (3) written in structured form. Block (a) contains effects of the aggregates, block (b) includes effects of the admixtures, block (c) presents synergetic effects of the aggregates and admixtures. The models are adequate to experimental data at the errors of 1% for ρ and 6% for f_{cm} , with significant coefficients at 10% risk.

$$\rho = 945.2 \begin{array}{|l|l|l|} \hline -39.5x_1 \pm 0 & x_1^2 + 6.5x_1x_2 & \pm 0 \ x_1x_3 \\ -73.3x_2 \pm 0 & x_2^2 & \pm 0 \ x_1x_4 \\ \hline -5.5x_3 + 10.9x_3^2 + 7.5x_3x_4 & & + 5.6x_2x_3 \\ -9.8x_4 + 11.8x_4^2 & & - 8.7x_2x_4 \text{ (c)} \\ \hline \end{array} \quad (2)$$

$$f_{cm} = 5.46 \begin{array}{|l|l|l|} \hline -0.75x_1 \pm 0 & x_1^2 \pm 0 \ x_1x_2 & + 0.19x_1x_3 \\ -1.14x_2 \pm 0 & x_2^2 & \pm 0 \ x_1x_4 \\ \hline -0.36x_3 + 0.40x_3^2 \pm 0 \ x_3x_4 & & + 0.22x_2x_3 \\ -0.55x_4 + 11.8x_4^2 & & \pm 0 \ x_2x_4 \text{ (c)} \\ \hline \end{array} \quad (3)$$

The uniformly distributed aggregate compositions were generated, 1000 points (x_1, x_2), for which the levels of the properties were determined by ES-models at constant values of admixtures contents (centers of their ranges). The reasonable number of points is conditioned by the size of factor domain under consideration (2^k , [5]). The vertices of k-dimensional factor cube, 4 vertices (± 1) of the square $\{x_1, x_2\}$ in our case, are added to generated random points to take part in computational experiment (since they could not theoretically be generated [5]).

The random compositions have been got with the help of Excel analysis package. All calculations are carried out in Excel.

After sorting these data by the level of the property Y_{IS} , which should remain specified constant C_{IS} , those of compositions (the points \mathbf{x}_{is}) are left for participation in the analysis, the values of Y_{IS} at which, according to the model $Y_{IS}(\mathbf{x})$, fall within the isoparametric corridor $C_{IS} \pm \Delta Y_{IS}(\mathbf{x}_{is})$. The width of the corridor ΔY_{IS} can be assigned based on the technical conditions of a specific task and, obviously, should cover the confidence interval [18] for Y_{IS} estimates (by the ES-model).

The levels of other Y under consideration are calculated by corresponding model at each \mathbf{x}_{is} , showing their changes in isoparametric corridor, that is, at approximately the same level of Y_{IS} . The best, for this or that Y , values of \mathbf{x}_{is} can be estimated.

The results of the research. The following results have been obtained when solving two tasks of IPA.

In the first case approximately constant level of ρ should be provided. This could be conditioned by specification for the material to be used in certain constructions, wall partitions or even floor coverings, for example. In the second case f_{cm} should be "almost constant" for similar reasons.

The level assigned for ρ as Y_{IS} was $\rho_{is} = 950 \pm 10 \text{ kg/m}^3$. The results of scanning the field of ρ_{is} in acceptable region is shown in Fig. 2.

Shown in Fig. 3 are the results of scanning the fields of f_{cm} and $f_{c.tf}$ at $\rho \approx 950 \text{ kg/m}^3$. The following maximal levels of these properties and the contents of the aggregates providing them under this condition are $f_{cm \max} \cong 6.1$ at $x_1 = -0.86, x_2 = 0.25$ (CS = 32.8, P = 18.8) and $f_{c.tf \max} \cong 2.2$ at $x_1 = -0.93, x_2 = 0.34$ (CS = 31.4, P = 20.1).

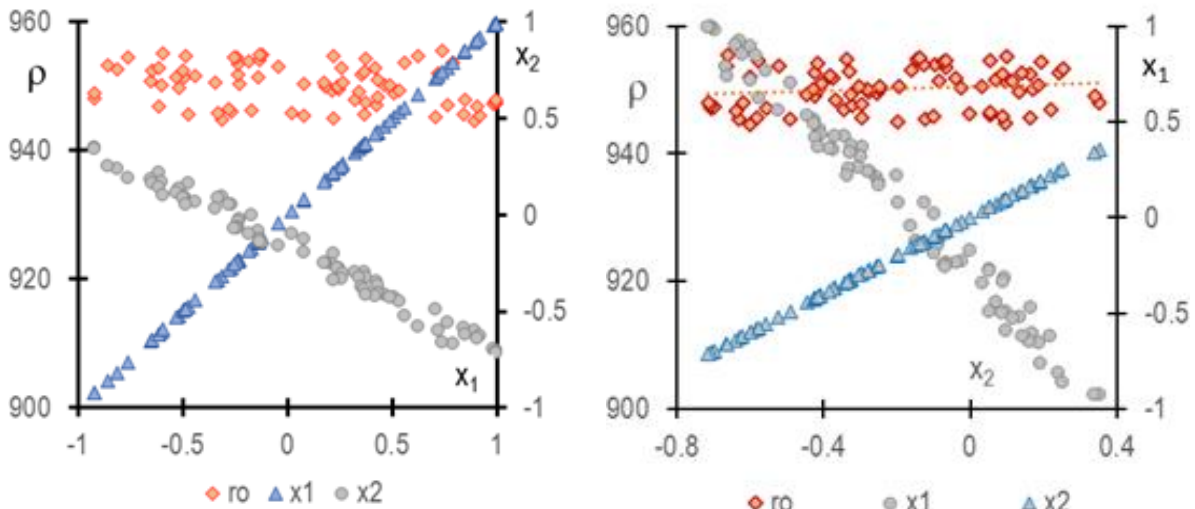


Fig. 2. Approximately constant density of about 9.5 (kg/m^3) provided by variation of content of aggregates CS and P (x_1, x_2)

In the second case the level assigned for f_{cm} as Y_{IS} was $f_{cm \text{ is}} = 5.0 \pm 0.2 \text{ MPa}$.

Shown in Fig. 4 are the results of scanning the fields of ρ and $f_{c.tf}$ at $f_{cm} \approx 5.0 \text{ kg/m}^3$. The following minimal level of ρ and maximal $f_{c.tf}$ with the contents of the aggregates providing them under this condition are: $\rho_{\min} \cong 854.7 \text{ kg/m}^3$ at $x_1 = 0.63, x_2 = 0.34$ (CS = 31.4, P = 20.1) and $f_{c.tf \max} = 2.2$ at $x_1 = 0.76, x_2 = -0.95$ (CS = 65.2, P = 0.0).

The estimates of properties levels in Figs. 2-4 are the results of one realization of statistical trials. However, the estimates obtained after numerous realizations of compositions imitation converge to estimates quite close to presented results (practically coinciding).

The existence of significant positive correlation between density and strength is considered evident and is known from various studies of materials. It was shown [11] for lightened gypsum concrete under study, in particular. But here we see that the same density can correspond to greater or less strength (Fig. 3). And rather low density could be accompanied by rather high strength (Fig. 4). This fact could not be directly observed from experimental data. This was revealed in computational experiment for isoparametric analysis.

Conclusions. It was managed in the presented study to demonstrate the new capabilities, the special facet of computer isoparametric analysis. It could be especially useful in multicriteria multifactor studies of any high-performance materials.

This conclusion is based on the results of solving two specific tasks in the study of lightweight gypsum concrete filled with cenospheres and perlite particles. In the first one material

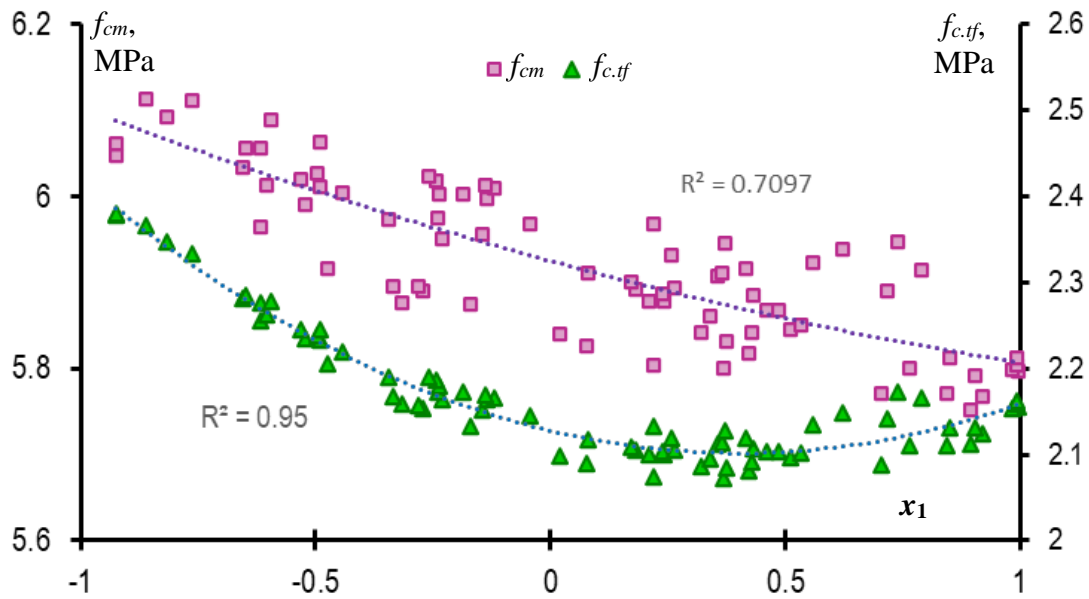


Fig. 3. Changes of strength with "constant" density about 9.5 kg/m^3 , provided by varying the content of aggregates CS and P (x_1, x_2)

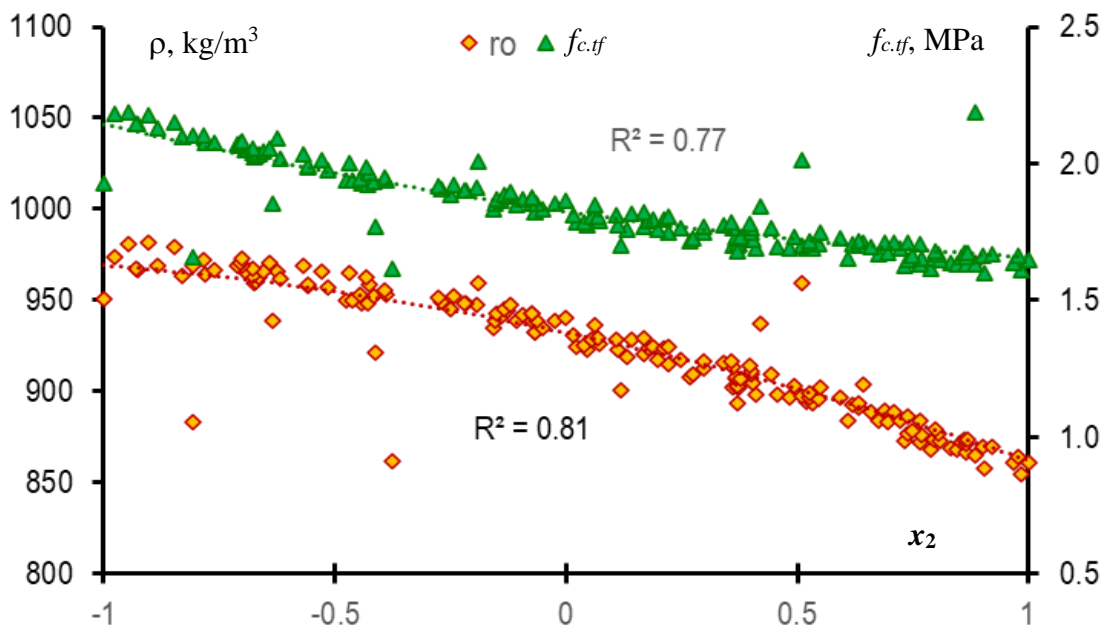


Fig. 4. Changes of density and bending strength under condition of $f_{cm} \approx 5.0 \text{ kg/m}^3$, provided by varied content of aggregates P and CS (x_2, x_1)

density was to be kept approximately constant and variation of compression and bending strength under this condition should be considered. In the second task the compression strength had to be about the specified constant and changes in the density and bending strength under this condition were shown. It had turned out that the materials of the same density could be of significantly different strength, and relatively low density could be accompanied by rather high strength.

References

- [1] R. Patle, N.A. Dubey, "Dispersed Phase Reinforcement-Based Composite Classification System", *African Journal of Biological Sciences*, 6 (6), pp. 6901-6908, 2024.
- [2] M. Sidney, "High Performance Concrete: Where Do We Go from Here?", *Brittle Matrix Compos.*, 8, pp. 15–23, 2006.
- [3] C. Shi, Y.L. Mo, *High-Performance Construction Materials*. New York, World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., 2008.
- [4] W.P. De Wilde, C.A. Brebbia, S. Hernández, *High Performance Structures and Materials*. VI, Ashurst (UK), WIT Press, 2010.
- [5] T.V. Lyashenko, V.A. Voznesensky, *Composition-process fields methodology in computational building materials science*. Odessa, Astroprint, 2017.
- [6] T. Lyashenko, "Composition-process fields methodology for design of composites structure and properties, Int.Symp", *Brittle matrix composites 11*, Warsaw, Institute of Fundamental Technological Research PAS, pp. 289-298, 2015.
- [7] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th ed. John Wiley & Sons, 2019.
- [8] Bradley Jones, Douglas C. Montgomery, *Design of Experiments: A Modern Approach*, 1st Edition, Wiley, 2019.
- [9] T.V. Lyashenko, N.R. Antoniuk, N.V. Khlytsov, I.K. Bichev, "Computational experiments when studying materials properties influenced by "mixture" factors", *Modern construction and architecture*, no. 9, pp. 62-70, 2024.
- [10] K. Moskalova, T. Lyashenko, A. Aniskin, M. Orešković, "Modelling the Influence of Composition on the Properties of Lightweight Plaster Mortar and Multicriteria Optimisation", *Materials*, 16(7):2846, 2023.
- [11] V.A. Voznesensky, *Statystychni metody planuvannia eksperymentu v tekhniko-ekonomichnykh doslidzhenniakh*. 2-he vydannia. Finansy ta statystyka, 1981.
- [12] T.V. Lyashenko, A.D. Dovgan, "Isoparametric analysis when studying composite materials", *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, vol. 66, pp. 72-78, 2017.
- [13] T. Lyashenko, V. Kersh, D. Kersh, "Modelling the effect of composition on the properties of gypsum concrete containing cenospheres", *18 ibausil*, Weimar (Germany), vol. 1, pp. 416-423, 2012.
- [14] T. Wandell, "Cenospheres: From Wastes to Profits", *The American Ceramic Society Bulletin* 75, 6, pp. 79-81, 1996.
- [15] K.N. Lapko, "Inorganic hollow microspheres – high performance fillers for building materials", *Modern dry mixes technologies in construction*, 2006, pp. 106-110.
- [16] A.A. Pashkevich, E.G. Pervushin, D.V. Oreshkin, "Hollow glass microspheres and forming structural cement systems", *Building Physics in XXI century*, 2006, pp. 147-150.
- [17] V.A. Voznesensky, *Suchasni sposoby optymizatsii kompozytsiinykh materialiv*. K.: Budivelnyk, 1983.
- [18] V.A. Voznesensky, T.V. Lyashenko, B.L. Ogarkov, *Chislennyye metody resheniya stroitel'no-tekhnologicheskikh zadach na EVM*. K.: Vyshcha shkola, 1989.

**ЯК ЗМІНЮЮТЬСЯ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ,
ЯКЩО ОДНА З НИХ НЕЗМІННА?**

¹Ляшенко Т.В., д.т.н., професор,
frabul16@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6232-4866

¹Керш В.Я., к.т.н., професор,
kersh@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6085-5260

¹Антонюк Н.Р., к.т.н., доцент,
antonuk_nr@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1730-0723

¹Хлищов М.В., к.т.н., доцент,
khlytsov@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0003-3486-6833

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

Анотація. Статтю відкривають кілька слів про історію та важливість у розвитку цивілізації композиційних матеріалів, дисперсних систем з багатокомпонентними дисперсійним середовищем та дисперсною фазою. Це та методологія полів властивостей матеріалів в координатах рецептурно-технологічних факторів, які описуються експериментально-статистичними (ЕС) моделями – передумови дослідження, представленого у цій статті. Одним із основних засобів методології є випадкове сканування рецептурно-технологічних полів. Цілі роботи – показати, як цей інструмент дозволяє оцінити зміну властивостей, якщо одна з них має бути незмінною, на прикладі вирішення двох завдань у дослідженні полегшеного гіпсобетону, з ценосферами та перлітом як заповнювачами. Розподіл розміру мікросфер із середнім близько 0.1 мм та середній розмір частинок перліту 0.3-0.5 мм можуть припустити досить компактне їхнє пакування та формування відносно стабільного каркасу. Використовуються ЕС-моделі залежностей щільності та міцностей на стиск та вигині від вмісту заповнювачів та дозувань двох хімічних добавок, побудовані за даними спланованого натурального експерименту. В обчислювальних експериментах генеруються склади (заповнювача при фіксованих середніх значеннях дозування добавок), оцінки для них властивостей по моделям дозволяють виконати ізопараметричний аналіз. У першому прикладі з аналізу виключаються склади, при яких рівень щільності бетону виходить за задані межі ізопараметричного коридору. Оцінюються зміни міцностей за умови приблизно постійної необхідної щільності. Можуть бути визначені найбільш міцні за цієї умови. У другому прикладі необхідною постійною має бути забезпечена міцність на стиск. Оцінюються зміни щільності та міцності на вигин за цієї умови, за їх рівнями у складах, що залишилися в ізопараметричному коридорі для міцності на стиск. У цьому випадку можуть бути визначені найлегші композиції заданої міцності. Електронна мікроскопія може бути рекомендована для візуалізації та розуміння механізмів явищ у міжфазних шарах «матриця-інертні заповнювачі». Ізопараметричний аналіз виявився дуже корисним у матеріалознавстві.

Ключові слова: експериментально-статистична модель, ізопараметричний аналіз, полегшений гіпсобетон, ценосфера, перліт, міцність, щільність.

Стаття надійшла до редакції 5.06.2025

This work © 2025 by Lyashenko T.V., Kersh V.Ya., Antoniuk N.R., Khlytsov N.V. is licensed under CC BY 4.0

THE EFFECT OF DIFFERENT TYPES OF MODIFIERS ON THE PROPERTIES OF BITUMENS AND ASPHALT CONCRETE BASED ON THEM¹**Tkach S.V.**,

tkach.serhii@ukr.net, ORCID: 0009-0005-5626-785X

¹**Kroviakov S.O.**, Doctor of Engineering, Professor,

skrovyakov@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0800-0123

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

4 Didrikhson Str. Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. Highways are extremely important for the development of the national economy and the renovation of infrastructure under wartime conditions. The main material for road pavement construction is asphalt concrete, which includes petroleum bitumen. In Ukraine, the only producer of this material is the Kremenchuk Oil Refinery (PJSC "Ukratnafta"), which necessitates the import of bitumen.

The research paper investigates the effect of various modifiers (polymeric, energy-saving, adhesive and wax additives), as well as their complex modification, on the bitumen performance of Kremenchuk Oil Refinery. The experimental evaluation of bitumen physical and mechanical properties after its modification was carried out, namely: needle penetration depth (penetration) at 25⁰ C, ring and ball softening temperature, and tensile strength. For polymer additives, their effect on bitumen elasticity was also determined. In addition, the effect of modifiers on the quality of the asphalt mixture was investigated: average density, water saturation, tensile strength at 20⁰ C and 50⁰ C, and water resistance coefficient using the rapid method.

The research results demonstrated that the modifiers have a similar effect on bitumen performance, namely, they reduce the penetration and increase the softening point, but with a different degree. All the modifiers, except for the energy-saving Veleton additive, also had a positive effect on the quality of asphalt concrete. This effect of the Veleton additive is probably due to the unusual temperature regime for bitumen modification and asphalt mix preparation, which requires additional research. Polymer additives (in particular, Elvaloy) demonstrated the greatest efficiency, significantly improving the performance of asphalt concrete.

The findings can be used to optimize asphalt mixtures, which will help to increase the durability of the road surface and effectively restore Ukraine's transport infrastructure.

Keywords: petroleum road bitumen, polymer, synthetic wax, compressive strength, water saturation, asphalt mix.

Introduction. The great stretch and fork of highways is the key to the development of the national economy. Unfortunately, the road sector of Ukraine is in a long-term crisis situation, characterized by the insufficient transport and operational condition of a significant part of the road stretch and critical deterioration of the road infrastructure. However, wartime road construction is an integral part of both defensive and humanitarian strategies.

The most common road surface is asphalt concrete. The main binder for the production of asphalt concrete mixtures is petroleum road bitumen. The content of this binder in the mixture is usually 4.5–7.0 % weight. Today, there is only one manufacturer of petroleum road bitumen in Ukraine – the Kremenchuk Oil Refinery (PJSC Ukratnafta). It is not able to meet all the country's demand for this component, so most road construction companies import bitumen. The use of domestic bitumen is a priority for Ukrainian manufacturers, both in terms of cost and delivery time. In order to improve the bitumen characteristics and, as a result, asphalt mixtures, there are modification techniques with various additives. Improving the asphalt quality results in better work performance and pavement durability. Complex additives are widely used, which can significantly improve the heat-resistant, rheological properties of modified bitumen and their adhesion to the

surface of mineral materials [1]. Therefore, the task of improving the bitumen properties of Kremenchuk Oil Refinery due to the use of modern modifiers available on the domestic market is relevant.

Analysis of researches and publications. Today, about 80 % of paved roads in the world have a top layer of bitumen-based materials, mainly asphalt concrete, which provides maximum comfort and efficiency of vehicle and passenger traffic [2].

The use of road bitumen and the operation of pavements based on it causes a number of problems, the most urgent of which are insufficiently high heat resistance and adhesion characteristics of bitumen (even if they meet the requirements of regulatory documents) [3]. Since the bitumen used in Ukraine is produced from light, highly paraffinic oil, such bitumen should be considered as modified [4].

Asphalt pavements must provide maximum standardized strength and shear resistance, resist fatigue failure, and be resistant to daily and seasonal temperature cycles throughout their service life. Today, one of the most effective technological methods to improve the quality of asphalt mixtures during their production and to provide for the preservation of the physical and mechanical characteristics of asphalt concrete unchanged during its service life is the use of polymer-modified bitumen [5].

According to the research of many scientists, polymer additives, adhesive, synthetic and natural waxes are used to modify bitumen [5-10].

Modification with polymers can achieve a positive effect on the high and low temperature characteristics and viscoelastic qualities of asphalt concrete [6]. Polymers also improve mechanical properties, increase resistance to permanent deformation, and resistance to low-temperature cracking. The most commonly used additives are copolymers, such as styrene-butadiene-styrene (SBS), ethylene vinyl acetate (EVA), styrene-ethylene-butylene-styrene (SEBS), and others. The widespread use of these types of polymers for modification is due to their thermoplastic behavior at higher temperatures and the ability to form a polymer network during cooling [7].

To obtain polymer-modified bitumen (PMB), a number of imported additives are used, such as "Elvaloy 4170" manufactured by "DuPont" Chemical Corporation, which is a copolymer of ethylene with butyl acrylate and glycidyl methacrylate, thermoplastic elastomers such as styrene-butadiene-styrene SBS "Kraton D" by "Kraton Polimers", synthetic latexes of the "Butonal NS" series by "BASF", etc.

Bitumen has insufficient cohesion (adhesion) with most stone materials used in road construction. This causes a sharp drop in the water resistance of asphalt concrete and the formation of damage on the pavement. Therefore, to improve the bitumen adhesion to stone materials and increase the water resistance of asphalt concrete, adhesive additives are added to the binder [9].

Waxes are used to modify bitumen. For example, Asphaltan A and Asphaltan B (Romonta), Licomont® (Clariant) and Sasobit® (Sasol), as well as various Biomer waxes produced by Deurex® AG (Elsteraue, Germany). Biomer waxes consist of various proportions of natural paraffin waxes, sugar cane wax and their fatty acids. Waxes are usually used as additives that change the viscosity and increase the softening point of bitumen [10].

Most often in Ukraine, adhesive and polymer additives are used separately or in combination [3, 5, 6]. The main disadvantage that slows down the increase in the production of bitumen modified with thermoplastic elastomers is their high cost (1.5–2.5 times higher than the cost of non-modified bitumen). Therefore, it is important to search for inexpensive substances that would improve the performance characteristics of bitumen, primarily adhesion [3]. In addition, an option to reduce the cost of modified bitumen is a combined modification by reducing the amount of polymer and adding either wax or adhesive additives, which cost less than the polymer.

The literature review made it possible to conclude that today there is a wide range of modifiers of petroleum road bitumen designed to improve its characteristics, and, accordingly, the characteristics of the finished asphalt mix and asphalt concrete. Determining the optimal combination of additives to provide advanced asphalt concrete performance is an urgent task that is important for the post-war reconstruction of the country, considering the destruction of the roads throughout

Ukraine.

The purpose of the study is to determine the effect of various modifiers and their complex on the bitumen and asphalt mixtures quality indicators.

Materials and methods of research. The basis was bitumen of BND 70/100 grade, supplied to the contractor in Odesa region from the Kremenchuk Oil Refinery. Its main characteristics are shown in Table 1.

Table 1 – Key indicators of BND 70/100 bitumen from Kremenchuk Refinery

Indicator	Value
Penetration depth of the needle (penetration) at 25° C, 0.1 mm	73
Softening point, °C	46.7
Tensile strength (ductility) at temperature 25° C, cm	77

The following modifiers were used:

- AVE 18 complex additive is a special additive based on a polymer mixture [11]. It is added to bitumen and requires thorough mixing at the temperature 165–175° C for 2–4 hours;
- Veleton energy-saving additive [11] has high adhesive properties, is very quickly mixed in bitumen;
- synthetic wax with the energy-saving effect [11] – a mixture of granules with a size 3 to 5 mm, mass fraction of the dust fraction up to 1 %, with a fusion point of 110° C;
- polymer ELVALOY [12] – a copolymer of ethylene-butyl acrylate-glycidyl methacrylate, with a fusion point 72° C.

Despite the manufacturers’ recommendations, the same modifier amount was added to the bitumen, namely 1.5 % of the bitumen weight, to observe how the same modifier amount changes the characteristics of the original bitumen.

Each modified bitumen was used to produce a fine-grained dense asphalt mix, type A, grade I, in accordance with State Standard of Ukraine BB.2.7-319:2016 [13].

Research results. After the modification with 4 different additives in the same amount (1.5 %), the tests were carried out (according to [14-17]) and the results are given in Table 2.

Table 2 – Characteristics of the original non-modified bitumen and bitumen when modified with the additives in the quantity of 1.5 %

Name of the indicators	BND 70/100 + modifying additive, % wt					Requirements		
	Non-modified bitumen	polymeric Elvaloy	energy-saving additive Veleton	complex Veleton AVE 18	synthetic wax Veleton	State Standard 9116:2021 for the BMW brand 50/70-60	SOE 42.1 - 37641918-068:2017 for the BMW brand 40/60	
		1.5%						
Homogeneity	No clots or additive particles					No clots or additive particles		
Needle penetration depth (penetration), $m \cdot 10^{-4}$ (0.1 mm) at 25° C	73	64	57	48	53	51-70	40-60	
The softening point of the ring and ball, °C	46.7	54.9	49.6	51.6	53.5	not less than 60	not less than 62	
Tensile strength (ductility) $m \cdot 10^{-2}$ at 25° C	77	54	54	45	80	not less than 6	not less than 20	
Elasticity, %	-	40	-	20	-	not less than 55	-	

The test results show that for the modified bitumen, the penetration and tensile strength decreased (Fig. 1), and the softening point increased (Fig. 2). In the studies of Juraj Šrámek, Matúš Kozel, Luboš Remek, and Ján Mikolaj, the same trend was observed when adding the SBS polymer [18]. The researchers L. Talakh, O. Koreva, O. Shymchuk, O. Andriychuk, O. Uzhegova, S. Drobyshynets, when considering the Kraton D and Calpren polymers, as well as the synthetic wax Sasobit, also found that the penetration decreased [19], and the softening temperature behind the ring and ball increased [20].

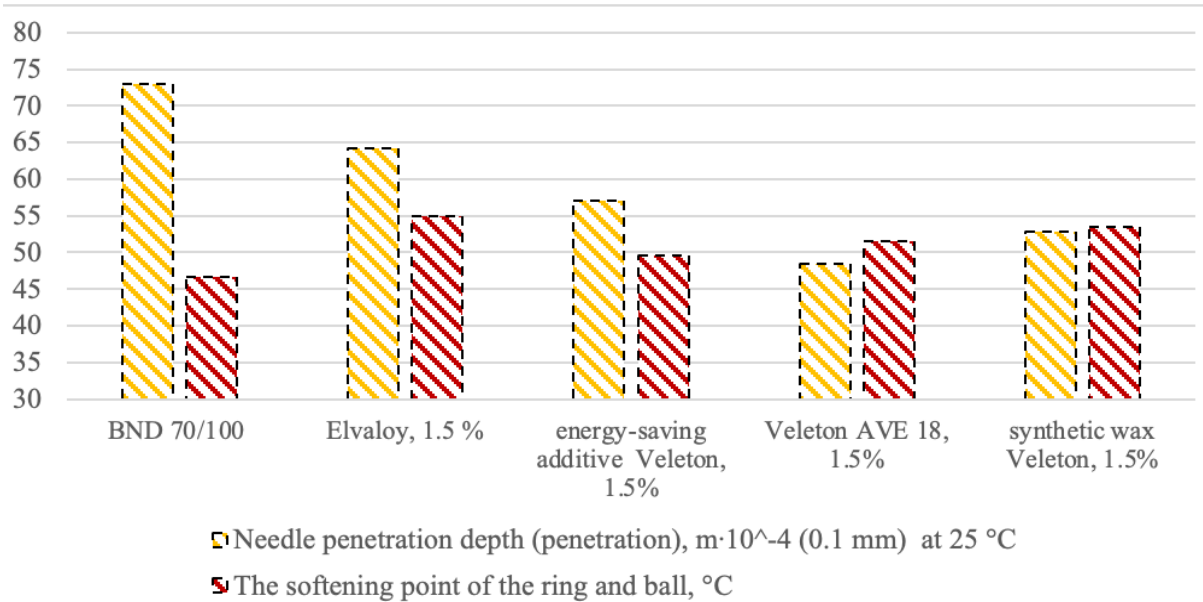


Fig. 1. Effect of the modifiers on the needle penetration depth (penetration) and softening temperature

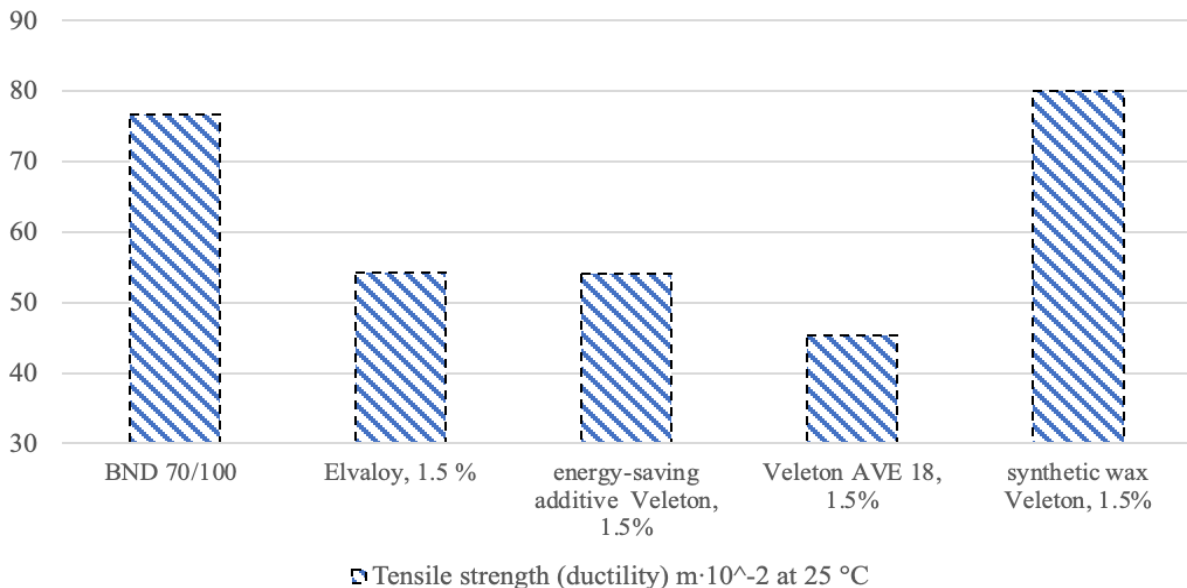


Fig. 2. Effect of modifiers on the tensile strength (ductility) at 25° C

After conducting the modification with all four additives separately, the effect of the complex modification [21] on the bitumen properties was determined. Thus, synthetic wax in the amount of 0.5 % and polymer in the amount of 1.5 % from the bitumen weight were added to the bitumen. The modification with the polymer lasted 80 minutes at the temperature 170–180° C, and with the wax 30 minutes at the temperature 150–160° C. The effect of the order of modifiers addition was also considered (Table 3).

Table 3 – Test results of the original bitumen and its modification with the combination of additives

Name of the indicators	BND 70/100 + modifying additive, % wt						Requirements	
	Non-modified bitumen	polymeric	complex	complexes			State Standard 9116:2021 for the BMW brand 50/70-60	State Standard 9133:2021 for BMKP50/70-65 grade
		Elvaloy	Veleton AVE 18	Elvaloy+ Wax Veleton	Veleton AVE 18+ wax Veleton	wax Veleton + Veleton AVE 18		
		1.5	1.5	1.5+0.5	1.5+0.5	0.5+1.5		
Homogeneity	No clots or additive particles							
Needle penetration depth (penetration), $m \cdot 10^{-4}$ (0.1 mm) at 25 ⁰ C	73	64	48	54	46	52	51-70	51-70
The softening point of the ring and ball, ⁰ C	46.7	54.9	51.6	55.4	54.2	54.7	not less than 60	not less than 60
Tensile strength (ductility) $m \cdot 10^{-2}$ at 25 ⁰ C	77	54	45	31	48	34	not less than 6	not less than 6
Elasticity, %	-	40	20	31	20	16	not less than 55	-

Analyzing the test results, we can say that the addition of synthetic wax increases the softening point of bitumen, while reducing the penetration and tensile strength. Changing the order of adding modifying additives showed that it also has a certain effect on the penetration rate, while the softening point remains almost unchanged. As for the elasticity, it can be concluded that none of the conducted studies showed the compliance with the regulatory documentation, but this is explained by the percentage of polymer addition, since the polymer was added less than the manufacturer’s recommendations. The results are summarized in Table 3 and illustrated in Figs. 3–4.

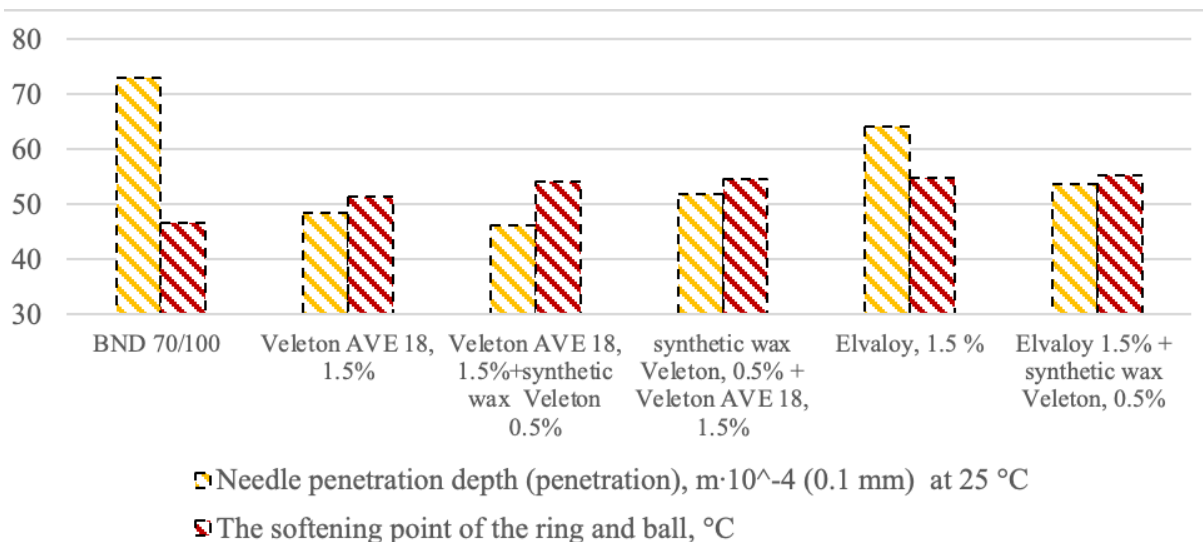


Fig. 3. Effect of modifiers on the needle penetration depth (penetration) and softening temperature by ring and ball

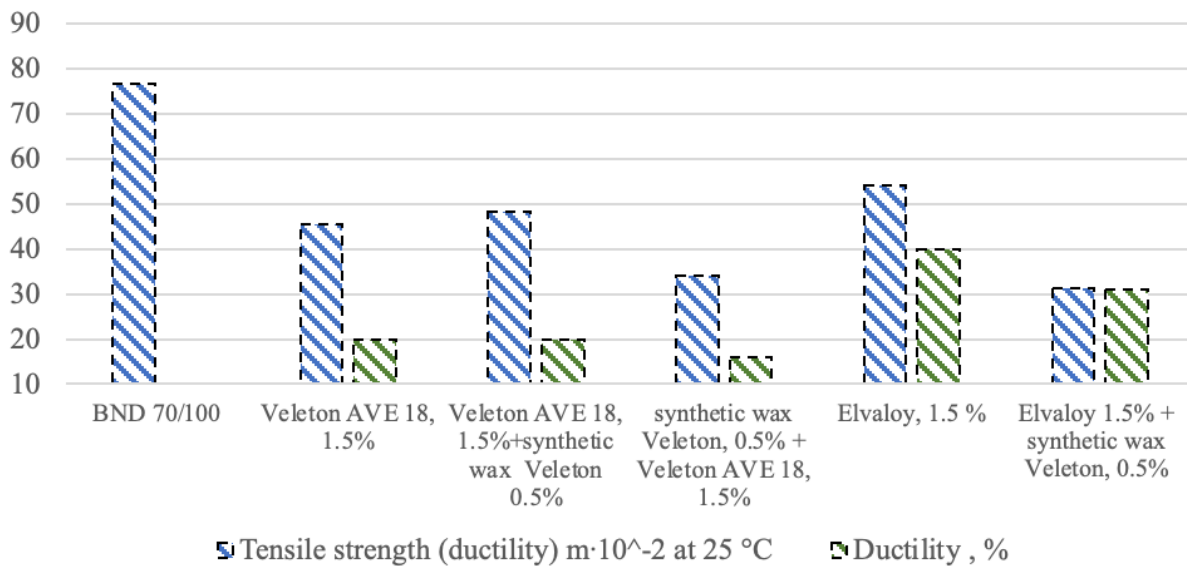


Fig. 4. Effect of modifiers on elasticity and ductility at 25°C

Hot dense fine-grained asphalt mix type A grade I, the composition of which is shown in Table 4, was made from modified bitumen samples, and the following indicators were determined: average density, water saturation, compressive strength at 20° C and 50° C; short-term water resistance coefficient [22, 23].

Table 4 – Composition of the asphalt mixture for the research

Asphalt concrete component	Material content in the mixture at 100%, % w
Crushed stone fraction 10-20 mm	22.8
Crushed stone fraction 5-10 mm	20.9
Screening fraction 0–5 mm	41.9
Aggregates made of secondary rock	9.5
BND 70/100 bitumen (without additives or modified)	4.9

The temperature conditions for the production and compaction of asphalt mixtures without and with various modifiers are shown in Table 5.

Table 5 – Main temperature conditions of manufacturing and compaction of ASG.DR.SH.A.NP.I

Binder	Modifier	Temperature, °C			
		Components of ASG.DR.SH.A.NP.I		ASG.D.S.A.NP.I	
		bitumen binder	crushed stone material	mixing	compaction
BND 70/100, PJSC “Ukratnafta”	-	155	170	165	155
	Elvaloy	180	180	175	165
	Veleton. AVE 18	180	180	175	165
	Energy-saving Veleton	160	180	170	160
	Wax Veleton	155	170	165	155
	Wax + Veleton. AVE 18	165	180	170	160
	Wax + Elvaloy	165	180	170	160

The testing results of the physical and mechanical characteristics of asphalt concrete are shown in Table 6 and Figures 5–9.

Table 6 – Testing results of the physical and mechanical characteristics of asphalt concrete made from the original bitumen and its modification with additives in the amount of 1.5 %.

Name of indicators	BND 70/100 + modifying additive, % wt					Requirements	
	Non-modified	polymeric	energy-saving	complex	wax	STATE STANDARDS B.2.7-119:201	STATE STANDARDS D 8959:2019
		Elvaloy	Veleton	Veleton. AVE 18	Veleton		
Average density, t/m ³	2.40	2.42	2.41	2.41	2.40	not standardized	
Water saturation, % by volume	3.6	2.3	2.7	1.9	2.7	not more than 4.0	
Compressive strength, MPa, at 20° C	5.1	5.9	5.0	5.3	5.5	not more than 2.8	not more than 3.7
Compressive strength, MPa, at temperature 50° C	1.6	2.6	1.3	1.8	1.9	not less than 1.3	not less than 1.8
Water resistance coefficient by the express method	0.95	0.94	0.93	0.98	0.92	not standardized	

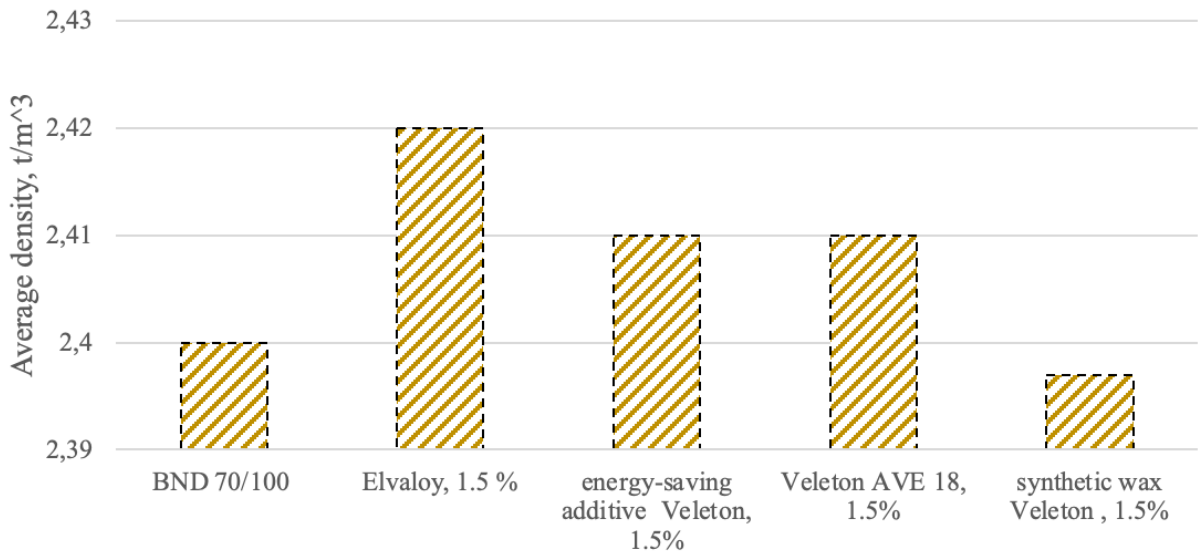


Fig. 5. Effect of modifiers on the average density of asphalt concrete

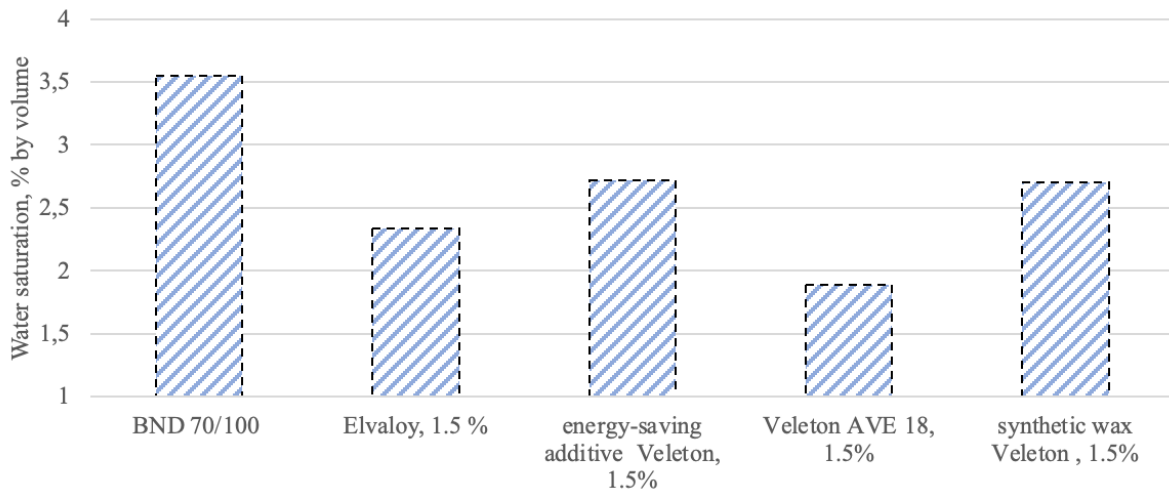


Fig. 6. Effect of modifiers on water saturation of asphalt concrete

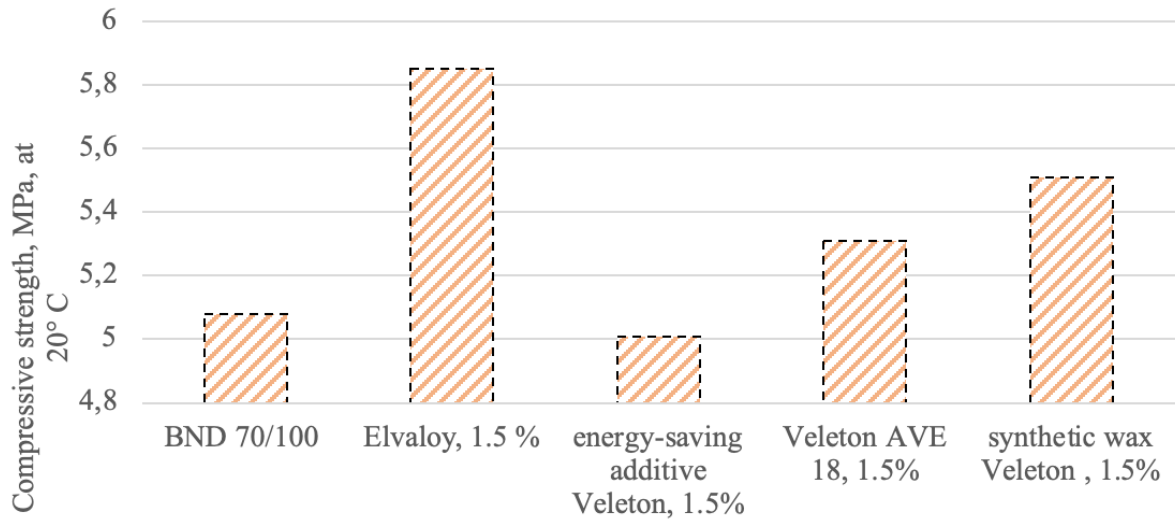


Fig. 7. Effect of modifiers on the compressive strength of asphalt concrete at 20° C

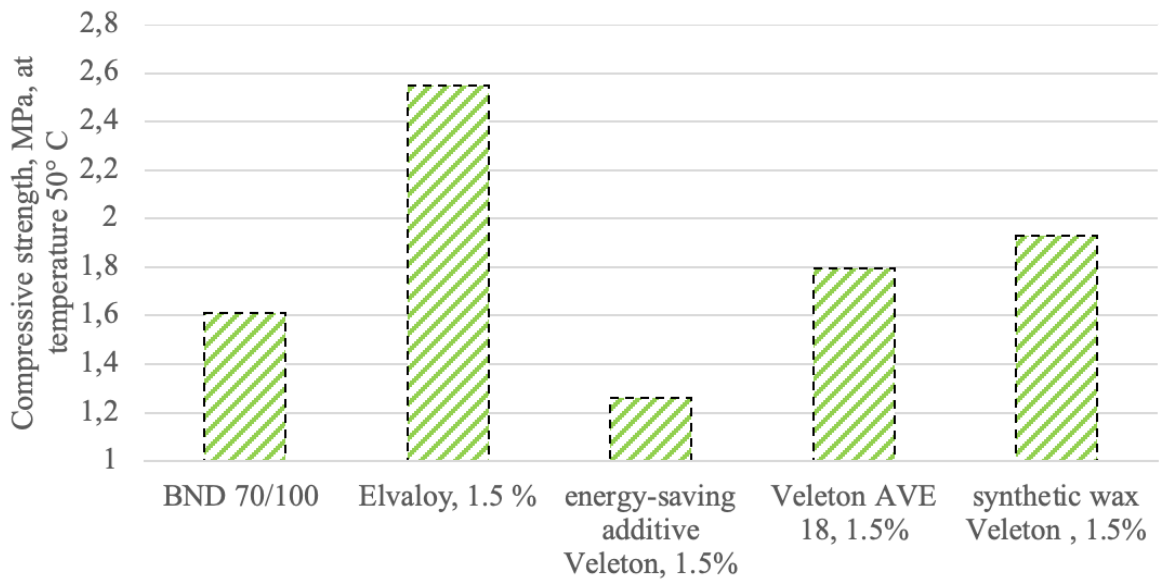


Fig. 8. Effect of modifiers on the asphalt concrete compressive strength at the temperature of 50° C

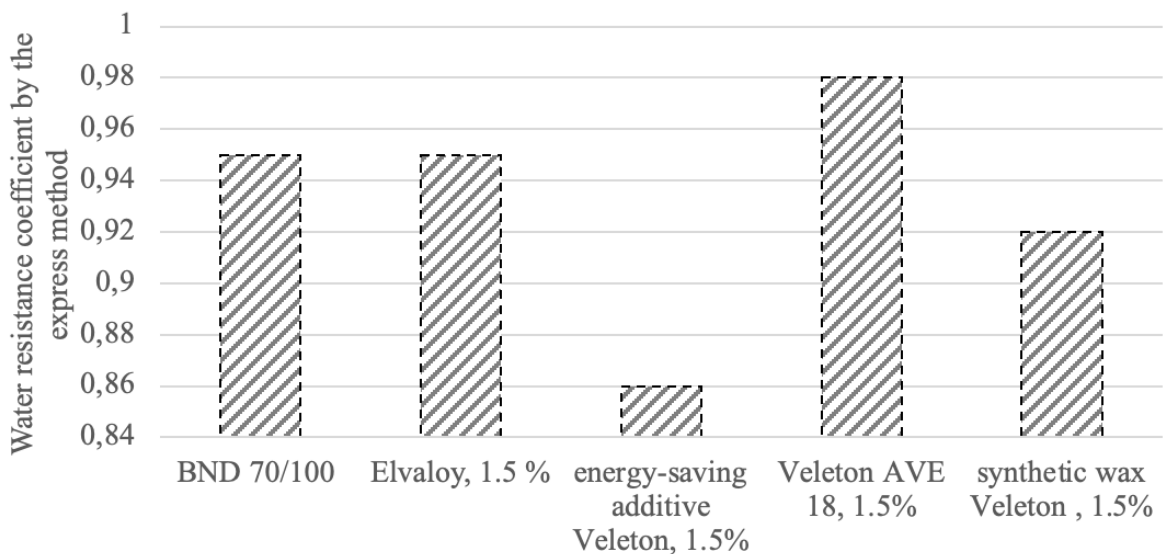


Fig. 9. Effect of modifiers on the water resistance coefficient of asphalt concrete using the express method

According to the test results, it can be concluded that, except for the energy-saving additive VELETON, all the additives have a positive effect on the characteristics of asphalt concrete, namely, decreasing of the water saturation percentage in terms of volume, increasing of the compressive strength at the temperature 20° C and at the temperature 50° C. V. Zhdaniuk, O. Volovyk, O. Makarchev in their study of the effect of synthetic waxes Licomont BS 100 and CCBit 113 AD [24], as well as S. Chuguenko in his study of the polymer Kraton D1101, synthetic wax Licomont BS 100, and cationic surfactant Wetfix BE [25] on the properties of road asphalt concrete, obtained a similar effect on both the properties of bitumen and the characteristics of the asphalt mixture. Such an effect of bitumen with the energy-saving additive VELETON is probably explained by the suboptimal temperature conditions for the preparation and compaction of the asphalt mixture. In fact, the temperature of the mixture was 160–180° C, and the compaction was 150–160° C. Moreover, the bitumen was heated to the temperature 155–165° C, and the stone material 170–180° C. The results of the studies of characteristics changes of asphalt concrete on bitumen with a combined modification are shown in Table 7.

Thus, there was the effect that in most cases, synthetic wax in the combination with a polymer showed worse results than the modification with a polymer additive only: decreasing of the compressive strength, increasing of the water saturation. This may also be due to the temperature of the asphalt mixture components, which is higher than usual for polymer-modified bitumen, namely modified bitumen 170–180° C, stone material 180–190° C, mixture temperature 160–170° C, and when compacted 150–160° C.

Table 7 – Test results of asphalt mixtures on bitumen with the complex modification

Name of indicator	BND 70/100 + modifying additive, % wt						Requirement	
	Non-modified bitume	polymeric	complex	complex			STATE STANDARD B V.2.7-119:2011	STATE STANDARD 8959:2019
		Elvaloy	Elvaloy+ bick	Veleton. AVE 18	Bick + Veleton. AVE 18	Veleton. AVE18 +Bick		
		1.5 %	1.5 % + 0.5%	1.5%	0.5% + 1.5%	1.5 %		
Average density, t/m ³	2.40	2.42	2.41	2.41	2.40	2.39	not standardized	
Water saturation, % by volume	3.6	2.3	2.4	1.9	3.8	3.2	not more than 4.0	
Compressive strength, MPa, at 20 °	5.1	5.9	5.2	5.3	4.4	5.1	not less than 2.8	not less than 3.7
Compressive strength, MPa, at 50 °C	1.6	2.6	2.4	1.8	2.3	1.6	not less than 1.3	not less than 1.8
Water resistance coefficient by the express method	0.95	0.94	0.98	0.98	0.95	0.97	not standardized	

Conclusions and prospects for further research.

1. The use of the analyzed modifying additives for bitumen (complex additive AVE 18 [11], energy-saving additive Veleton [11], synthetic wax with energy-saving effect [11], polymer ELVALOY [12]) has the same type of the effects, but in varied ways, namely, decreasing of the penetration and tensile strength and increasing of the softening point.

2. The most effective among the analyzed additives, both in terms of simplifying of the modification process (72° C fusion temperature) and in terms of the modified bitumen, was the ELVALOY polymer. Also, the use of this additive increases the compressive strength of asphalt concrete at the temperature 20° C by 15 % and at the temperature 50° C by 58 %. However, the

market cost of the additives varies, which should be considered when making technical decisions in real practice.

3. The use of only the energy-saving additive VELETON leads to the reduction of the compressive strength at both 50° C and 20° C, so further research is needed to determine the cause of such results.

4. In the future, it is planned to continue investigating the effect of modifying additives on the properties of bitumen and asphalt concrete, both not considered in this work and considered under other conditions, both proportional and temperature.

References

- [1] Yu.B. Hrytsenko, Oderzhannya bitumiv i bitumykh emul'siy, modyfikovanykh inden-kumaronovymy smolamy: dysertatsiya na zdobuttya naukovoho stupenya kandydata tekhnichnykh nauk: Natsional'nyy universytet "L'vivs'ka politekhnika". L'viv, 2016. [Online]. Available: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1497/dysertgrytsenko.pdf>. Accessed on: May 02, 2025.
- [2] V. Zolotariov, "Dorohu ne importuyesh, yi treba pobuduvaty", Ofitsiynyy sayt Natsional'noyi asotsiatsiyi dorozhnykiv Ukrainy. [Online]. Available: https://nadu.com.ua/dorogu-ne-importiruesh-ee-nuzhno-sdelat/?utm_source=chatgpt.com. Accessed on: May 02, 2025.
- [3] Yu.Ya. Demchuk, Bitymy, modyfikovani smolamy, oderzhanymy z fenol'noyi fraktsiyi kam'yanovuhil'noyi smoly: dysertatsiya na zdobuttya stupenya doktora filosofiyi: Natsional'nyy universytet "L'vivs'ka politekhnika". L'viv, 2020. p. 213. [Online]. Available: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/radaphd/5664/disertaciya-demchuk.pdf>. Accessed on: May 02, 2025.
- [4] I.V. Kopynets', O.B. Sokolova, A.L. Yunak, "Vybir bitymu dlya vyrobnytstva asfaltobetonnykh sumishey z urakhuvannyam ekspluatatsiynykh umov", *Dorohy i mosty*, vyp. 25, pp. 48–57, 2022. doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.048.
- [5] Ya.I. Pyrih, A.V. Galkin, M.A. Svnaryov, V.P. Koryuk, Ya.V. Il'in, V.O. Zolotariov, "Asfaltopolimerbetony, vyhotovleni shlyakhom vvedennya polimeru bezposeredno v sumish," *Visnyk KhNADU*, vol. 68, pp. 85-91, 2015.
- [6] Hao Xin Qu, Kexin Qiu, Ruiqi Zhao, Qianyu Liu, "Evolution of Structure and Properties of SBS-Modified Asphalt during Aging Process", *Buildings*, 14(1), 291, 2024. doi.org/10.3390/buildings14010291.
- [7] Bagdat Teltayev, Erik Amirbayev, Boris Radovskiy, "Evaluating the Effect of Polymer Modification on the Low-Temperature Rheological Properties of Asphalt Binder", *Polymers*, 14(13), 2548, 2022. doi.org/10.3390/polym14132548.
- [8] S.V. Pysh'yev, S.Yi. Solodkyy, Yu.B. Hrytsenko, Yu.V. Sidun, "Vykorystannya inden-kumaronovoyi smoly dlya oderzhannya modyfikovanykh bitymiv, emul'siy ta tonkosharovykh emul'siyno-mineral'nykh dorozhnykh pokryttiv", *VuhleKhimichnyy zhurnal*, 2015, pp. 36-43.
- [9] Y. Demchuk, I. Sidun, V. Gunka, S. Pyshyev, S. Solodkyy, "Effect of Phenol-Cresol-Formaldehyde Resin on Adhesive and Physico-Mechanical Properties of Road Bitumen", *Chemistry & Chemical Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 456–461, 2018. <https://doi.org/10.23939/chcht12.04.456>.
- [10] Tess Sigwarth, Johannes Büchner, Michael P. Wistuba, "Bio-Degradable Wax to Modify Asphalt Binder for Warm Mix Asphalt", *Sustainability*, 14(16), 10219, 2022. doi.org/10.3390/su141610219.
- [11] Ofitsiynyy sayt kompaniyi VELETON. [Online]. Available: <https://www.veleton.ua>. Accessed on: May 02, 2025.
- [12] Kharakterystyky polymeru DuPont™ Elvaloy® 741. [Online]. Available: <https://iigc.mx/Fichas/DuPont-Elvaloy-741.pdf>. Accessed on: May 02, 2025.

- [13] DSTU B V.2.7-319:2016. Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton dorozhniy ta aerodromnyy. Metody vyprobuvan'. K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2017.
- [14] DSTU 4044:2019. Bitymy naftovi dorozhni vyaz'ki. Tekhnichni umovy. K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2020.
- [15] DSTU 9116:2021. Bitymy dorozhni, modyfikovani polimeramy. K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2022.
- [16] SOU 42.1-37641918-068:2017. Bitymy dorozhni vyaz'ki, modyfikovani dobavkamy na osnovi voskiv. Tekhnichni umovy. K.: Derzhavne ahentstvo avtomobil'nykh dorih Ukrayiny, 2017.
- [17] DSTU-N B V.2.7-303:2015. Nastanova shchodo pryhotuvannya ta zastosuvannya bitymiv, modyfikovanykh dobavkamy na osnovi syntetychnykh voskiv. K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2016.
- [18] J. Šrámek, M. Kozel, L. Remek, J.M. Ikolaj, "Evaluation of Bitumen Modification Using a Fast-Reacting SBS Polymer at a Low Modifier Percentage", *Materials*, 16, 2942, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16082942>.
- [19] L.O. Talakh, O.O. Koreva, O.P. Shymchuk, O.V. Andriichuk, "Vyznachennia hlybiny pronyknennia holky (penetratsii) modyfikovanykh bitumiv", *Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*, vyp. 9, pp. 143-148, 2018. [Online]. Available: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/stmrb_2018_9_21.pdf. Accessed on: May 02, 2025.
- [20] L.O. Talakh, O.A. Uzhehova, S.Ya. Drobyshechynets, "Vyznachennia temperatury rozmiakshennia modyfikovanykh bitumiv za kiltsem ta kuleiu", *Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*, vyp. 10, pp. 153-159, 2018. [Online]. Available: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/stmrb_2018_10_22.pdf&P21DBN=UJRN. Accessed on: May 02, 2025.
- [21] DSTU 9133:2021. Bitymy dorozhni, modyfikovani kompleksamy dobavok. K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2022.
- [22] DSTU B V.2.7-119:2011. Sumishi asfaltobetonni i asfaltobeton dorozhniy ta aerodromnyy. K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2012.
- [23] DSTU 8959:2019. Asfaltobetonni sumishi ta asfaltobeton dorozhni na osnovi bitymiv, modyfikovanykh polimeramy. Tekhnichni umovy. K.: Minrehionbud Ukrayiny, 2021.
- [24] V.K. Zhdaniuk, K.V. Tsyrukunova, D.Yu. Kostin, O.O. Makarchev, "Doslidzhennia vplyvu dobavok syntetychnykh voskiv ta lateksiv, yak modyfikativ bitumiv, na vlastyvoli asfaltobetoniv", *Naukovi notatky*, (46), pp. 177-181, 2014. [Online]. Available: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Nn_2014_46_29.pdf. Accessed on: May 02, 2025.
- [25] S.A. Chuhuienko, "Doslidzhennia vplyvu modyfikativ bitumu na morozostiikist asfaltobetoniv", *Naukovi visnyki budivnytstva*, vyp. 4, pp. 128-132, 2025. [Online]. Available: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Nvb_2015_4_32.pdf. Accessed on: May 02, 2025.

ВПЛИВ РІЗНИХ ТИПІВ МОДИФІКАТОРІВ НА ВЛАСТИВОСТІ БІТУМІВ
ТА АСФАЛЬТОБЕТОНІВ НА ЇХ ОСНОВІ¹Ткач С.В.,

tkach.serhii@ukr.net, ORCID: 0009-0005-5626-785X

¹Кровяков С.О., д.т.н., професор,

skrovyakov@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0800-0123

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

Анотація. Автомобільні дороги мають критично важливе значення для розвитку національної економіки та відновлення інфраструктури в умовах воєнного часу. Основним матеріалом для будівництва дорожнього покриття є асфальтобетон, до складу якого входить бітум нафтовий дорожній. В Україні єдиним виробником цього матеріалу є Кременчуцький НПЗ (ПАТ «Укртатнафта»), що зумовлює необхідність імпорту бітуму.

У роботі досліджено вплив різних модифікаторів (полімерних, енергозберігаючих, адгезійних та воскових добавок), а також їх комплексна модифікація на характеристики бітуму Кременчуцького НПЗ. Проведено експериментальну оцінку змін фізико-механічних властивостей бітуму після його модифікації, а саме: глибини проникнення голки (пенетрації) за температури 25 °С, температури розм'якшення за кільцем та кулею, розтяжності. Для полімерних добавок також визначався їх вплив на еластичність бітуму. Крім того досліджено вплив модифікаторів на якість асфальтобетонної суміші: середню густину, водонасичення, границю міцності при температурі 20 °С та 50 °С, коефіцієнт водостійкості за експрес-методом.

Результати дослідження показали, що модифікатори мають схожий вплив на характеристики бітуму, а саме дозволяють досягнути зниження пенетрації та підвищення температури розм'якшення, проте в різній мірі. Всі модифікатори окрім енергозберігаючої добавки Veleton також позитивно впливали на показники якості асфальтобетону. Такий ефект від застосування добавки Veleton вірогідно пов'язаний з неприямним для неї температурним режимом модифікації бітуму та приготування асфальтобетонної суміші, що потребує додаткових досліджень. Найбільшу ефективність продемонстрували полімерні добавки (зокрема Elvaloy), які значно покращують експлуатаційні показники асфальтобетону.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації складів асфальтобетонних сумішей, що сприятиме підвищенню довговічності дорожнього покриття та ефективному відновленню транспортної інфраструктури України.

Ключові слова: бітум нафтовий дорожній, полімер, синтетичний віск, міцність при стиску, водонасичення, асфальтобетонна суміш.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2025

[This work](#) © 2025 by [Tkach S.V.](#), [Kroviakov S.O.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

RESISTANCE OF COMPOSITE BUILDING MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF THE ENVIRONMENT

¹**Shevchenko V.V.**, postgraduate student,
lab.psk.ogasa@ukr.net, ORCID: 0008-0000-1814-7762

¹**Nepomiashchiy A.M.**, PhD,
lottor27@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0281-0598

¹**Vyrovoy V.M.**, Doctor of Engineering, Professor,
vyrovoy@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8818-4112

¹**Bachinsky V.V.**, PhD., Senior Researcher,
slawa_dk@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2187-8616

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

Abstract. The article provides a detailed analysis of the impact of climatic conditions on the physical and mechanical properties of building materials, particularly concrete, which is a key material for construction structures. The study examines the complex effects of temperature and humidity fluctuations, freeze-thaw cycles, and wetting-drying processes, which cause irreversible structural changes in the material. These factors are identified as the main reasons for the reduction in durability and stability of composite building materials under operating conditions.

The analysis revealed that the climatic conditions of southern Ukraine, characterized by significant daily and seasonal temperature variations, high precipitation levels during the autumn-winter period, and elevated summer temperatures, exert a complex impact on concrete. These climatic factors contribute to the development of internal defects, such as microcracks, degradation of the porous structure, and a decrease in adhesion between the material's components. The role of not only freeze-thaw cycles, which cause stress in the structure of concrete, but also wetting-drying processes and the overall complex influence of climatic factors, is emphasized.

The article substantiates the importance of considering climatic impacts during the design stage of concrete composition. Based on experimental research, it has been established that cyclical climatic influences cause changes in characteristics such as compressive strength, flexural strength, ultrasonic wave velocity, water absorption, and carbonation depth.

The findings highlight the necessity of developing compositional and technological solutions to enhance the resistance of building materials to climatic factors. The article proposes recommendations for the development of concretes with improved operational characteristics, which will extend the service life of structures and ensure their safety.

Keywords: climatic influences, durability, stability of structures, freezing-thawing, moistening-drying, structural changes, physical and mechanical characteristics, adaptation of concrete.

Introduction. The safe operation of structural elements, buildings, and facilities must be ensured throughout their entire lifecycle. Experts distinguish between external and internal safety for any objects considered as systems of a certain type [1]. External safety refers to the system's ability, during interaction with the environment, to prevent alterations in its primary parameters. The main purpose of a structure as a subsystem is to interact harmoniously with similar subsystems, which collectively ensure the integrity and fulfillment of the functional purpose of the building volume as a complexly organized open system. External safety is critical because, if stability is compromised, the system could pose a threat to neighboring structural elements, potentially lowering the system's overall safety level.

Internal safety characterizes the system's capacity to retain its integrity and essential functional properties under internal and external impacts. Here, it is emphasized that internal safety is defined by the system's homeostasis indicator [2].

Comprehensive safety is understood as a system state in which a certain balance of external and internal safety is maintained through spontaneous structural parameter adjustments within limits that ensure necessary property manifestations (adaptation).

Adaptation properties are particularly characteristic of concrete as a complexly organized material, which determines the entire range of properties in construction structures. The operation of structural elements, buildings, and facilities a priori implies the permanent impact of the surrounding environment. Concrete responds to changes in temperature, humidity, as well as static and dynamic loads, leading to irreversible structural changes that may alter its properties and thereby affect safe operational conditions. When assessing the durability and stability of concrete, the number of freeze-thaw cycles is typically standardized. Certain studies highlight the impact of alternating temperature and humidity changes on the durability of construction materials [1]. However, there is a lack of information on the behavior of building materials, including all types of concrete, under all types of climate impacts (integrated climatic effects).

In Ukraine, the average July temperature varies from +18°C in the northern regions to +21°C in the south. Daytime temperatures in July usually reach +22 to +26°C, while nighttime temperatures range from +11 to +15°C. The average January temperature ranges from -7°C in the northeast, -5°C in the central regions, to -2°C in the south. Nighttime temperatures vary from -11 to -9°C in the northeast and from -5 to -3°C in the south, with daytime temperatures from -6 to -3°C to 0 to +2°C, respectively.

The frost-free period in southern Ukraine lasts 260–270 days per year, while in the north, it is around 170–180 days. The highest annual precipitation occurs in the Carpathians, typically reaching 1400–1600 mm. The lowest precipitation is in the southern regions, with 250–350 mm annually in southeastern Ukraine, and 150–200 mm along the Black and Azov Sea coasts. Elsewhere in Ukraine, annual precipitation ranges from 600 to 800 mm. Thus, construction structures, buildings, and facilities in southern Ukraine are exposed to the integrated climate effects of the environment.

Analysis of Climate Conditions in Southern Ukraine. Table 1 presents average data on climatic conditions, with analysis of autumn-winter and spring-summer periods for construction sites in southern Ukraine during the 2014-2015 period.

Table 1 – Climatic conditions during the autumn-winter period

Phenomenon	Autumn-winter period
Clear	38 days
Fog	60 days
Rain (rain with snow)	52 days
Snow	24 days
Tmax of air	+10...+18°C
Tmin of air	-15 °C
Humidification-freezing thawing	46 cycles

In this case, the focus should not be on temperature gradients but rather on the fact of temperature transitions from negative to positive values. In the Odessa region, during the autumn-winter period, the temperature crossed the 0°C mark 46 times (cycles). Emphasis on temperature transitions across 0°C is related to the change in the aggregate state of water. When water transforms into ice, its volume increases by up to 9%, which, according to experts, is one of the key reasons for the adverse physical impact on the capillary-porous structure of building materials.

An analysis of climate conditions during the autumn-winter period revealed that precipitation during this time takes the form of rain, sleet, and snow [3]. Fog, sometimes dense, also occurs periodically, which leads to the wetting of building structures. Additionally, during the daytime, when temperatures rise above zero, structures can become damp due to the melting of ice and snow. At night, when temperatures fall below zero, water that has penetrated the porous spaces of building materials and structures freezes. Thus, within a single year, a series of wetting and drying, freezing and thawing cycles can occur in various types of construction structures.

The variety of factors that contribute to reduced durability prevents a unified criterion from being established for external influences that cause irreversible internal structural changes. Studies have highlighted [4, 5] the adaptability of concrete, as a complex system, to operational conditions. Special attention is given to the alternating cycles of heating-cooling and wetting-drying, which can lead to premature reductions in the safety and functionality of structures.

Table 2 provides data on the climatic conditions in southern Ukraine during the spring-summer period.

Table 2 – Climatic conditions during the spring-summer period

Spring-summer phenomenon	Spring-summer phenomenon
Clear (clear-cloudy)	90 days
Cloudy	49 days
Rain	37 days
Tmax of air	+34.7°C
Tmin of air	+14°C
Surface temperature	62 °C
Wetting-drying	26 cycles

The data on the operational conditions for construction structures of various types show that the moisture levels of most structures are influenced by fluctuating water levels and moisture resulting from changes in humidity due to irrigation (fog, rain). Drying of these wet structures generally occurs when the temperature rises and humidity decreases. Temperature changes are associated with shifts in weather conditions and daily fluctuations. When materials dry at elevated temperatures, temperature-related deformations occur in addition to moisture-induced deformations. The combined impact of moisture and temperature deformations is expected to lead to significant structural changes in the material, potentially affecting its resistance to repeated wetting and drying cycles.

Typically, temperature and moisture do not act in isolation but are inherently interconnected. Even in dry periods, temperature gradients on the surface and in peripheral zones of an object cause the migration of pore liquid within the concrete, a capillary-porous material. Additionally, temperature and moisture effects are unevenly distributed throughout the object, creating gradients in moisture and thermal deformations across the structure’s cross-section. Because temperature and moisture fluctuations follow certain cycles (daily, seasonal), deformation "waves" are assumed to continually pass through the structures (Fig. 1.)

The material in construction structures responds to the cumulative effects of external climatic impacts by repeatedly changing volume, which leads to structural changes that may result in a decline in properties below standard levels. Repetitive external impacts associated with temperature and humidity fluctuations are classified as low-cycle impacts that contribute to material fatigue.

The main climatic impacts on construction structures are recurring (daily, seasonal) thermal, moisture, and combined thermal-moisture effects, along with gradients of moisture and temperature across the object's cross-section. These impacts may lead to structural changes in the material that can cause premature failure. Therefore, during the concrete mix design phase, measures should be taken to ensure that required properties are maintained for the intended lifespan of the structure, considering technological deformations and stresses that could either strengthen or weaken the structure’s resistance to external influences [6].

Analysis of recent research. The analysis of the weather conditions in southern Ukraine showed that most concrete and reinforced concrete products and structures are operated under conditions of periodic changes in humidity and temperature. Such fluctuations lead to reversible and irreversible deformations that gradually alter the structure of concrete and contribute to the premature deterioration of their functional state.

According to established practice, the primary parameter determining the durability of building materials is their frost resistance – the ability to maintain strength and operational characteristics

under cyclic freezing and thawing in a water-saturated state. Frost resistance is directly related to the porosity of the material, and it can be improved by controlling the distribution of pores and capillaries. Particular attention is paid to the formation of reserve porosity, which creates conditions for the accumulation of free water during freezing, as noted by Powers [7].

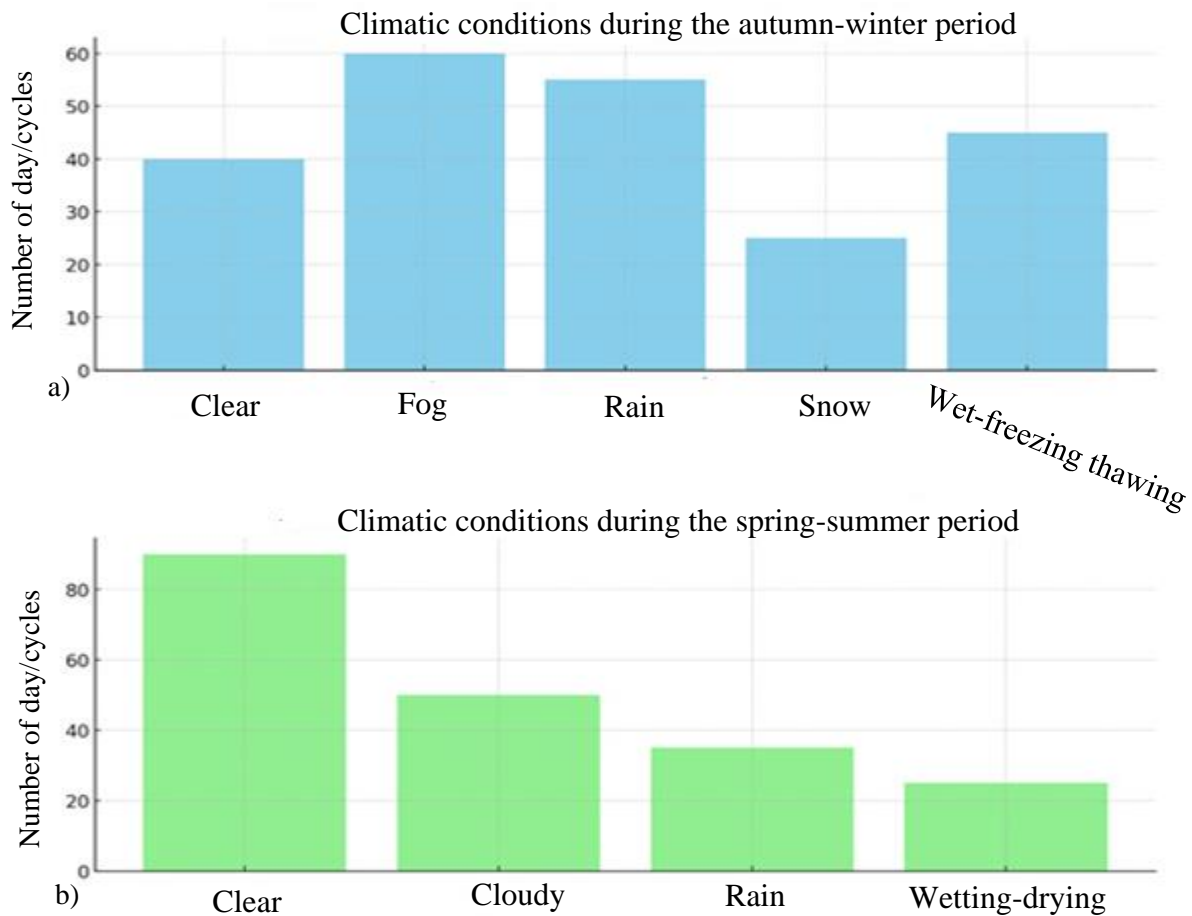


Fig. 1. Climatic conditions during: a – the autumn-winter period b – the spring-summer period

To enhance the frost resistance of building materials, air-entraining surfactants (SAS) are currently used. Studies by L. Y. Dvorkin, M. A. Sanitsky, V. R. Serdyuk, A. E. Sheikin, and other researchers have shown that modern surfactants contribute to optimizing the porous structure of concrete, positively affecting its frost resistance [8, 9]. Additionally, as noted by K.K. Pushkarova, E.O. Shinkevich, V.M. Derevyanko, the use of mineral nanoparticles allows adjusting the composite structure, changing porosity, and reducing deformation [10, 11].

The type of mineral binders significantly affects the frost resistance and water resistance of concrete, as confirmed by studies by M.Sh. Fominera, M.A. Sanitsky, S.M. Tolmachov, and other researchers [12, 13]. In particular, A.V. Mishutin, S.O. Krovjakov, A.A. Khomenko emphasize that local moisture or heating changes thermal deformations, impacting the weather resistance of materials [14, 15].

It has also been established that the crack resistance of concrete directly affects its durability, as highlighted in the works of I.M. Hrushko, S.Y. Solodky, Y.Y. Luchko, and other researchers.

Most scientific studies focus on the resistance of materials to individual weather impacts, such as heating-cooling or freezing-thawing. However, this approach may lead to an incomplete understanding of the actual operating conditions of structures. To more objectively assess the durability of materials, it is necessary to consider the complex impact of weather factors, including their cyclicity and changes in material characteristics under real conditions.

Taking into account the complex impact will allow for a more accurate assessment of the effectiveness of solutions to ensure the standard service life of construction objects. In particular, attention should be paid to rhythmic temperature, humidity, and temperature-humidity changes, which can cause

structural changes in the material and, consequently, its premature wear. Thus, at the stage of designing concrete compositions, measures should be provided to maintain the necessary properties throughout the entire operational period of the structure, considering possible deformations and stresses [16].

Research Aim and Objectives. The objective of the study is to analyze and consider adverse operating conditions related to individual and combined weather effects on the physical and mechanical properties and stability of concretes based on dense and porous aggregates.

To achieve the research goal, a series of tasks have been identified, including experimental studies to determine the impact of both individual environmental factors (related to humidity and temperature changes) and the integrated interrelated impact characterized by a model of periodic changes in weather loads (e.g., heating – cooling – moistening – freezing – thawing – drying).

The analysis of the obtained results will provide a more objective assessment of the entire spectrum of weather impacts on the properties and stability of concretes with various aggregates. This will allow for the proposal of adequate formulation and technological solutions to ensure the safe functioning of construction products, structures, buildings, and facilities.

Methodology. Experimental studies were conducted on prismatic samples measuring 10×10×40 cm and 10×10×10 cm, made of heavy concrete and expanded clay concrete.

After curing under normal conditions, identical samples were subjected to individual and combined climatic effects, including:

- Heating for 6 hours at $T = +105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ until moisture content $W = 20\%$, followed by cooling for 4 hours to $T = +30^{\circ}\text{C}$ (+t, t) (Fig. 2, a).
- Water saturation for 3 hours to $W = 80\%$, followed by drying for 12 hours to $W = 20\%$ (W, +t) (Fig. 2, b).
- Water saturation for 3 hours to $W = 80\%$, followed by freezing for 3 hours at $T = -18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, then thawing for 3 hours at $T = +20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (F, +W) (Fig. 2, c).

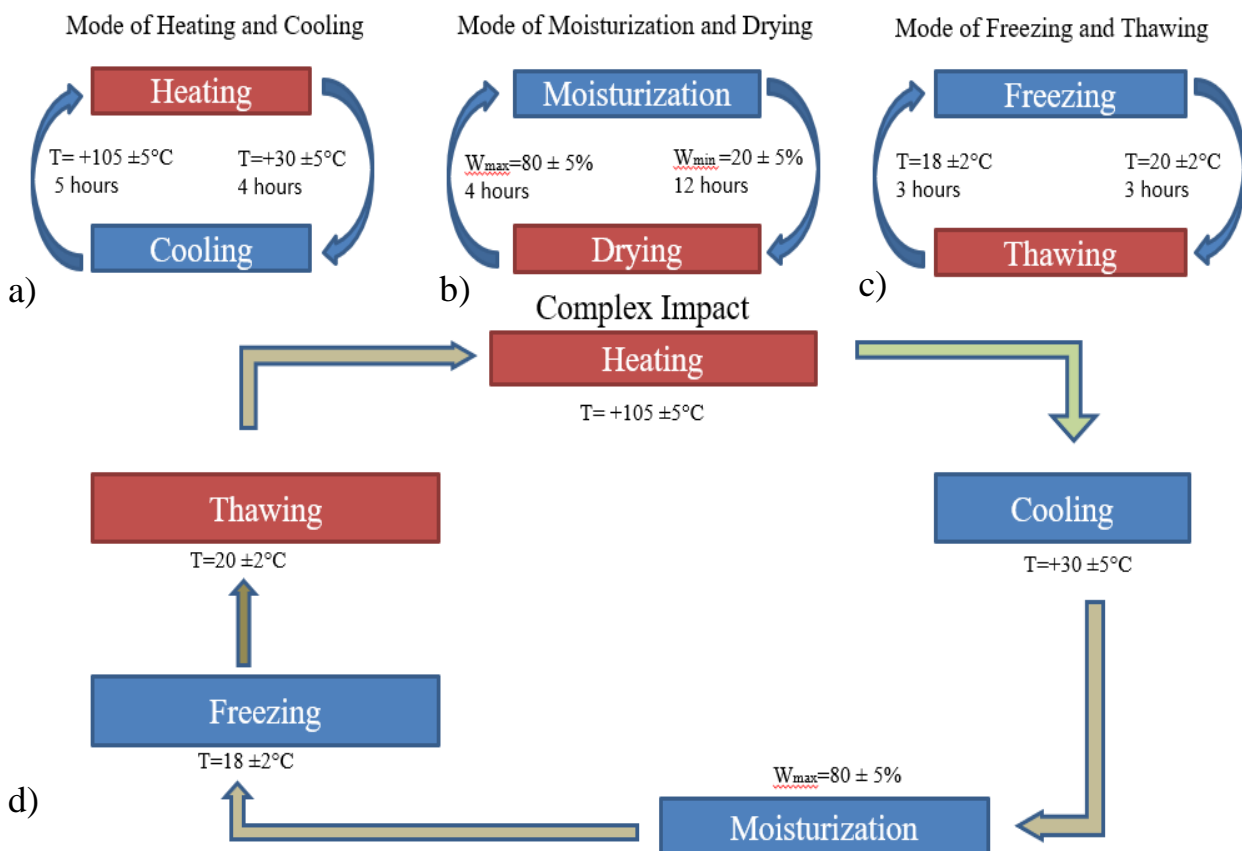


Fig. 2. Experimental Procedure:

a – Heating and cooling; b – Water saturation and drying; c – Freezing and thawing; d – Combined exposure

- Drying for 12 hours at $T = +105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ until $W = 20\%$, then cooling for 4 hours to $T = +30^{\circ}\text{C}$, followed by water saturation for 3 hours to $W = 80\%$, freezing for 3 hours at $T = -18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, and thawing for 3 hours at $T = +20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (Fig. 2, d).

The results of the research. After 15 cycles of heating and cooling, the ultrasonic wave velocity decreased by 11.6%, which may indicate the development of internal inhomogeneities, leading to reduced ultrasonic speed.

Flexural strength decreased by 33.3% compared to control samples (from $f_{\text{ctk}} = 13.8$ MPa to $f_{\text{ctk}} = 9.2$ MPa), and compressive strength dropped by 10.3% (from $f_{\text{ck}} = 55.1$ MPa, до $f_{\text{ck}} = 49.4$ MPa). The stability coefficient was $K_s = 0.9$.

After 15 cycles of wetting and drying, the ultrasonic wave velocity decreased by 2.5%. Flexural strength declined by 37.7% compared to control samples (from $f_{\text{ctk}} = 13.8$ MPa до $f_{\text{ctk}} = 8.6$ MPa), and compressive strength fell by 14.5% (from $f_{\text{ck}} = 55.1$ MPa, до $f_{\text{ck}} = 47.1$ MPa). The stability coefficient was $K_s = 0.85$. Over 15 full wetting and drying cycles, compressive strength was reduced by 15%.

After 15 cycles of freezing and thawing, the ultrasonic wave velocity dropped by 17.1%.

Flexural strength decreased by 50% (from $f_{\text{ctk}} = 13.8$ MPa до $f_{\text{ctk}} = 6.9$ MPa), while compressive strength reduced by 20.7% (from $f_{\text{ck}} = 55.1$ MPa, до $f_{\text{ck}} = 43.7$ MPa). The stability coefficient was $K_s = 0.8$.

After 15 cycles of combined impacts, ultrasonic wave velocity decreased by 16.8%. Flexural strength declined by 44.9% (from $f_{\text{ctk}} = 13.8$ MPa до $f_{\text{ctk}} = 7.6$ MPa), and compressive strength fell by 14.0% (from $f_{\text{ctk}} = 13.8$ MPa до $f_{\text{ctk}} = 7.6$ MPa). The stability coefficient was $K_s = 0.86$.

Conclusions. The analysis of climate conditions in Ukraine and the Odessa region showed that within a single year, repeated temperature and humidity fluctuations occur, affecting all types of construction. Under these integral climate impacts, building materials may experience a reduction in key property indicators, potentially compromising the safe operation of structures.

The analysis of experimental results demonstrated that with an increasing number of thermal and moisture cycles on concrete samples, structural changes occur depending on the conditions of heating, cooling, water saturation, freezing, and thawing. The study provided valuable insights into the effect of climatic conditions on changes in the physical and mechanical characteristics of construction materials.

The analysis revealed that freezing and thawing have the most detrimental effect on concrete strength compared to combined loading. These experimental results indicate that exposure to sub-zero temperatures plays a significant role in the resistance of materials and structures to environmental conditions. Further research programs have been developed to investigate the causes of this observed phenomenon.

References

- [1] V.N. Vyrovoy, V.S. Dorofeev, V.G. Sukhanov, "Osnovni bezopasnogo funktsionirovaniya konstruktsiy kak slozhnykh otkrytykh sistem", *Kompozitsionnye stroitelnyye materialy*, pp. 145–151, 2010.
- [2] I.V. Prangishvili, *Sistemnyy podhod i obschesistemnyye zakonomernosti*. SINGEG, 2000.
- [3] A.S. Lytvynenko, "Issledovanie tsiklichnosti pogodno-klimaticheskikh usloviy Ukrainy v svyazi s prognozirovaniem vliyaniya opasnykh prirodnykh yavleniy na sostoyanie avtomobilnykh dorog", *Dorohy i Mosty (Roads and Bridges)*, no. 6, pp. 74–90, 2006.
- [4] S.A. Mironov, O.S. Ivanova, L.A. Malinina, et al., "Zimnee betonirovanie i teplovaya obrabotka betona", *Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete*. 1975.
- [5] A.M. Podvalnyi, "O kontseptsii obespecheniya morozostoykosti betona v konstruktsiyah zdaniy i sooruzheniy", *Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*, no. 6, pp. 4–6, 2004.

- [6] V.G. Sukhanov, V.N. Vyrovoy, O.A. Korobko, "Usloviya ekspluatatsii stroitelnykh materialov i konstruktsiy. Osnovnyie napravleniya issledovaniy", *Material Structure in Construction Structure*, Odesa: POLYGRAPH, pp. 46–59, 2016.
- [7] T. C. Powers, "Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete", *J. Am. Concr. Inst.*, vol. 16, no. 4, 1945.
- [8] L.I. Dvorkin O.L. Dvorkin, "O podobii struktur morozostoykosti betonov", *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitelstvo*, no. 1, pp. 34–37, 2003.
- [9] L.G. Shpynova, O.L. Ostrovsky, M.A. Sanitsky, O.Ya. Shiyko, H.S. Sobol, B.V. Fedun, *Betonyi dlya stroitelnykh rabot v zimnih usloviyah*, Lviv: Vyscha Shkola, Publishing House at Lviv University, 1985.
- [10] K.K. Pushkaryova, M.V. Sukhanievych, A.S. Martsykh, "Vpliv vugletsevih nanotrubok na protsesi strukturoutvorenniya shlakomistkogo tsementnogo kamenyu", *Bulletin of OSACEA*, no. 57, Odesa, pp. 380–386, 2015.
- [11] V.M. Derevyanko, L.V. Moroz, V.Y. Moroz, "Nanotekhnologichni betoni. Analitichniy oglyad", *Aktualni problemi Inzhenernoyi mehaniki: Materials of the VII International Conference*, Odesa, pp. 251–254, 2020.
- [12] M.A. Sanitsky, I.V. Shikhnenko, L.A. Vandalovskaya, S.V. Zhernovoy, "Dobavki v betonyi, tverdeyushchie na moroze", *Stroitelnyie materialy i konstruktsii*, no. 1, p. 11, 1993.
- [13] V. L. Chernyavsky, *Adaptatsiya betona*, Dnipro: Nova Ideolohiya, 2002.
- [14] O.M. Nepomyashchy, V.M. Vyrovoy, S.S. Makarova, A.A. Khomenko, "Frost Resistance of Construction Composites During One-Sided Freezing", *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, no. 79, pp. 109–116, 2020.
- [15] O.M. Nepomyashchy, V.N. Vyrovoy, V. G. Sukhanov, "Vliyanie usloviy zamorazhivaniya na morozostoykost stroitelnykh kompozitov", *Ekspert: teoriya i praktika*, vol. 4, no. 7, pp. 41–46, 2020.
- [16] V.G. Sukhanov, V.N. Vyrovoy, O.A. Korobko, "Usloviya ekspluatatsii stroitelnykh materialov i konstruktsiy", *Struktura materiala v strukture konstruktsii*. Odesa: POLYGRAPH, 2016. pp. 46-59.

СТІЙКІСТЬ КОМПОЗИЦІЙНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВПЛИВІ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

¹Шевченко В.В., аспірант,
lab.psk.ogasa@ukr.net, ORCID: 0008-0000-1814-7762

¹Непомящий О.М., к.т.н.,
lottor27@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0281-0598

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

¹Бачинський В.В., к.т.н., с.н.с.,
slawa_dk@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2187-8616

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

Анотація. У статті здійснено детальний аналіз впливу погодних умов на фізико-механічні характеристики будівельних матеріалів, зокрема бетону, який є основним матеріалом для будівельних конструкцій. Розглянуто комплексний вплив температурних і вологісних коливань, циклів заморожування-відтавання та зволоження-висихання, які спричиняють незворотні структурні зміни в матеріалі. Саме ці фактори є ключовими причинами зниження довговічності і стійкості будівельних композиційних матеріалів в умовах експлуатації.

Аналіз показав, що кліматичні умови півдня України, які характеризуються значними добовими та сезонними перепадами температур, високим рівнем опадів в осінньо-зимовий період і підвищеними температурами влітку, створюють комплексний вплив на бетон. Ці кліматичні фактори сприяють розвитку дефектів, таких як мікротріщини, деградація порової структури та зниження адгезії між компонентами матеріалу. Важливу роль у цьому відіграють не тільки цикли заморожування-відтавання, які призводять до змін у структури бетону, а і зволоження-висушування та періодична зміна температури.

У статті обґрунтовані важливість погодних навантажень при проектуванні складу бетону. На основі експериментальних досліджень встановлено, що комплексні циклічні впливи викликають зміну таких характеристик, як міцність при стисканні, міцність на згин, швидкість проходження ультразвукових хвиль, водопоглинання та глибина карбонізації.

Отримані результати підкреслюють важливість враховувати комплексні погодні навантаження при прийнятті технологічних рішень для підвищення стійкості будівельних матеріалів, виробів та конструкцій. У статті запропоновано рекомендації для розробки бетонів із підвищеними експлуатаційними характеристиками, що дозволить продовжити термін служби конструкцій та забезпечити їхню безпеку.

Ключові слова: погодні впливи, бетон, довговічність, стійкість, заморожування-відтавання, зволоження-висушування, структурні зміни, адаптація бетону.

Стаття надійшла до редакції 28.03.2025

This work © 2025 by Shevchenko V.V., Nepomiashchiy A.M., Vyrovoy V.M., Bachinsky V.V. is licensed under CC BY 4.0

IMPROVEMENT OF HEAT UTILIZATION SYSTEMS WITH THERMAL PROCESS STABILIZATION IN ROTARY KILNS

¹**Geraskina E.A.**, PhD, Associate Professor,
geraskina@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3308-3776

¹**Khomenko O.I.**, PhD, Associate Professor,
khomenko@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2465-0273

¹**Khomenko A.A.**, PhD, Associate Professor,
a_khomenko@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2580-9861

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
Didrichsona Str., 4, Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. This article is devoted to improving heat utilization systems for industrial and municipal heat supply. It outlines methods for enhancing the cooling systems of kilns used in the firing of construction materials, identifies ways to stabilize the thermal regime, and establishes the conditions for developing functional layouts for furnace units. Rotary kilns, operating under varying environmental influences such as air temperature, wind speed, solar radiation, and atmospheric precipitation, lose up to 30% of their heat through the lateral surface into the surrounding environment. These external factors negatively affect the thermal condition of the furnace unit, leading to overheating during warm periods and overcooling in cold seasons, which in turn decreases the durability of the lining and the quality of the produced materials.

Typically, natural cooling of the kiln side surface is assumed in order to maintain the necessary internal surface temperature and extend the lining's lifespan. However, this is an uncontrolled process with the aforementioned disadvantages.

One approach to increasing the efficiency of fuel combustion heat utilization is the implementation of a regulated cooling system for rotary kilns. One possible solution is a recirculating channel design, which relies on the repeated use of the heat carrier flow. The share of recirculated flow increases as outdoor temperature decreases. Under summer design conditions, the system operates as a direct-flow type, delivering the entire stream to end users. In winter conditions, air is supplied from the bypass line.

Based on these considerations, formulas are derived for determining the main parameters of the stabilizing cooling system for rotary kilns, intended for residential and municipal heat supply applications.

Keywords: rotary kiln, heat recovery, industrial heat supply, air cooling, thermal regime stabilization.

Introduction. In the construction materials industry, improving the efficiency of fuel and energy resource use is a critical issue, especially for the production of energy-intensive products such as expanded clay, cement, lime, reinforced concrete structures and ceramic wall materials. These product types account for more than 50% of all fuel and energy resources consumed annually by the construction sector [1, 2].

Rotary kilns, operating under variable external conditions – including fluctuations in air temperature, wind speed, solar radiation, and precipitation – lose up to 30% of the utilized heat through their side surfaces into the environment. These impacts result in overheating of the kiln during warm seasons and excessive cooling during cold periods, ultimately reducing the durability of the lining and the quality of the final product.

To maintain the required temperature on the inner surface of the kiln and extend the service life of the lining, natural cooling of the unit's lateral surface is used. However, this is an uncontrolled process with certain drawbacks.

A radical solution for meeting thermal process requirements and improving the efficiency of fuel combustion energy recovery is the implementation of controlled cooling of the rotary kiln.

Review of Recent Research and Publications. In addition to the main publications [3-10], there are also studies [11-16] that propose new technical concepts aimed at improving the efficiency of heat utilization from the primary fuel during the processes of extraction, transformation, and utilization of waste heat from kiln surfaces. An analysis of existing technical solutions for applying recovered heat in industrial heat supply systems indicates the need for improving functional schemes that ensure a specified cooling level for furnace units.

Problem Statement. Meeting technological requirements and increasing the efficiency of heat utilization from fuel combustion can be achieved by organizing regulated cooling of rotary kilns. The development of heat supply systems based on the energy obtained from controlled kiln cooling highlights the need to refine the functional schemes that provide the required level of kiln unit cooling, while also enabling the use of recovered heat for industrial heat supply.

Materials and Methods. Rotary kilns are complex units where all thermal processes are implemented – from controlling the amount raw materials of input to obtaining the final product of the desired quality.

The general methodology for achieving the set objectives involves developing approaches and solutions from the perspective of treating the kiln as a powerful source of secondary heat. Based on this, conditions should be established for the rational extraction and utilization of heat from the outer surface of the unit.

The methodology is based on the energy balance between the justified volume of technological heat consumption and heat losses due to various non-productive expenditures. It also incorporates analysis of known methods for reducing heat consumption, the capabilities of consumer heat consumption systems, the impact of harmful environmental factors, and the recent significant increase in the cost of fuel.

The solution involves the use of mathematical and experimental modeling of thermal and aerodynamic processes. Experimental research is also required in laboratory settings with validation of the obtained results under industrial conditions.

Research Results. Stabilizing the thermal regime of a kiln using the proposed enclosure is based on extracting a specific amount of heat during the operational period, regardless of changes in the outdoor temperature. This ensures a relatively consistent thermal state of the kiln unit throughout its operation [8-10].

One of the simplest possible schematic solutions for implementing the proposed kiln arrangement is the use of direct-flow heat extraction systems from the surface of the rotary kiln (see Fig. 1, options *a* and *b*).

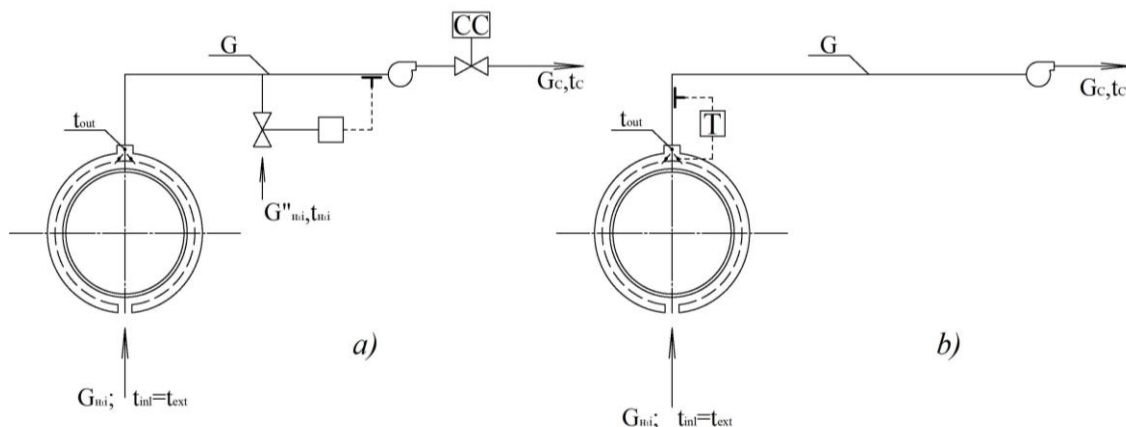


Fig. 1. Direct-flow heat extraction schemes from the rotary kiln surface:

a – option 1; *b* – option 2, with a bypass line; $t_{inl} = t_{ext}$ – temperature of the heat carrier at the inlet to the heat recovery device, °C; t_{out} – temperature of the heat carrier at the outlet, °C; $G'_{n,i}$ – mass flow rate of the heat carrier at the inlet, kg/h; $G''_{n,i}$ – mixed portion of the heat carrier, kg/h; G_{inc} – flow rate of the heat carrier incoming to the consumer, kg/h; t_{inc} – temperature of the heat carrier incoming to the consumer, °C; CC – consumption controller; T – temperature regulator

In these schemes, the steady heat flow is withdrawn from the kiln surface at a temperature midway between the inlet and outlet coolant temperatures, which is considered optimal for maintaining a stable external heat exchange throughout the operational period.

The bypass channel scheme (Fig. 1, b) allows for maintaining a constant coolant temperature at the outlet of the heat extraction device by using a temperature controller, while keeping the flow rate of the coolant nearly constant. This is achieved due to the structural design of the device, which enables qualitative modification of the effect of the variable part of the airflow in the outer enclosure channel on the amount of heat loss from the kiln shell surface as the flow velocity changes.

In this scheme, the stable thermal regime of the kiln can be maintained throughout the operating period using the same principle, but with improved quantitative and qualitative regulation of heat exchange on the outer surface of the kiln shell and reduced overall heat losses to the environment.

This configuration ensures a consistent flow rate of the recovered heat carrier to the consumer with minimal deviations during the entire period of operation, since the aerodynamic resistance of the overall duct system in the heat recovery unit remains unchanged – except for the resistance within the short internal channels of the device.

These internal resistances vary depending on whether the entire flow passes through the gap around the kiln or partially through the bypass line, corresponding to warm and cold periods of the year, respectively. Therefore, the mass flow rate of the coolant at the inlet and outlet of the device remains practically constant.

The inefficiency of using such schemes for the enclosed section of the rotary kiln lies in the following:

- any change in the heat carrier flow rate, depending on the outdoor air temperature, causes a change in the coolant velocity in the gap around the kiln. This affects the quality of heat transfer, i.e., the effectiveness of heat exchange on the kiln surface;
- the operation of the fan with variable air flow based on outdoor temperature must be automated with feedback on the coolant temperature after the enclosure. Moreover, as the outdoor temperature decreases, the electric motor will operate less efficiently;
- the direct-flow cooling system is not optimal for consumers of recovered heat, since the variable flow and variable temperature of the coolant rarely match the consumer's conditions and heat demand regime. As a result, it would require a large reserve capacity from a backup heat generator or would lead to excess heat being dumped into the environment – for instance, when combined with an air heating system.

Thus, although direct-flow air cooling systems for kiln enclosures are simple in design, they cannot ensure sufficient uniformity of cooling and stabilization of the thermal regime during heat recovery. Additionally, effectively using the recovered heat in rational consumer systems (such as heating or industrial processes) is quite difficult. These disadvantages can be overcome by applying a heat recovery system with a recirculation channel (Fig. 2).

This system can ensure continuous heat extraction from the kiln and is based on the reuse of the heat carrier flow, with the recirculated portion G_R increasing as the outdoor temperature t_{ext} decreases. The core principle is that, during operation, a stable temperature differential and air flow through the heat recovery device can be maintained, regardless of external air temperature fluctuations.

In the recirculation scheme, outdoor air in a volume of $G'_{h,i}$ is drawn in by fan 1, passes through the heat recovery unit 2, where it is heated, and is then supplied to the consumer 3 (e.g., for combustion air, material drying, or space heating).

Full stabilization of the heat extraction process can be achieved by maintaining a constant flow rate and temperature of the air passing through the heat recovery unit. To accomplish this, the scheme (Fig. 2) includes an automatic flow rate controller 4 and a three-way valve 5 that adjusts the proportion between the volume of outdoor air $G''_{h,i}$ and the recirculated air $G_{\delta,i}$ from the bypass line 7, ensuring that the air entering the heat utilization unit 2 remains at a constant temperature.

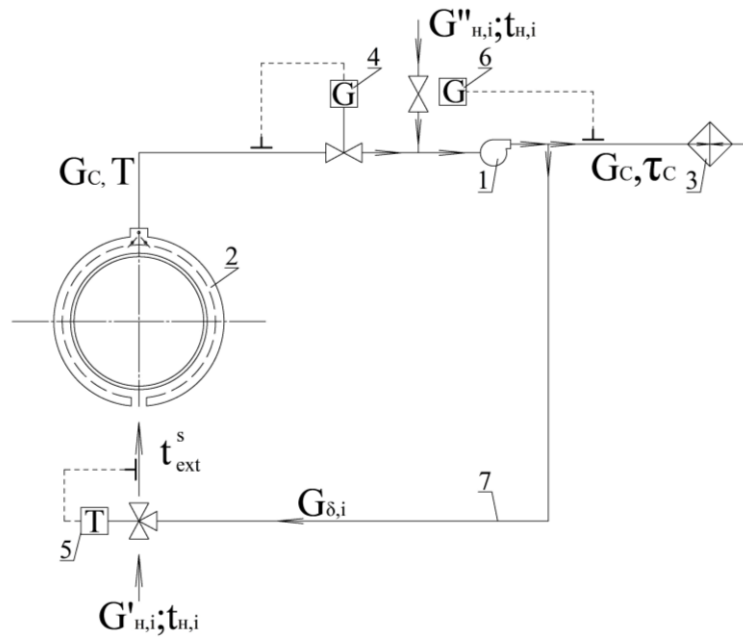


Fig. 2. Heat recovery system with a recirculation channel:

1 – fan; 2 – heat recovery unit; 3 – heat consumers; 4 – automatic flow rate controller; 5 – three-way valve; 6 – flow stabilizer; 7 – bypass line; $G'_{h,i}$ – flow rate of incoming heat carrier, kg/h; $t_{ext,i}$ – temperature of incoming heat carrier; $G_{\delta,i}$ – recirculated portion of heat carrier, kg/s; $G''_{h,i}$ – secondary intake of outdoor air, kg/s; G_c – flow rate of the heat carrier delivered to the consumer, kg/h; t_c – temperature of the heat carrier delivered to the consumer, °C

As the outdoor temperature t_{ext} changes, the amount of air flowing through the bypass $G_{\delta,i}$ also changes. To maintain a stable total airflow to the consumer G_c , a secondary intake of outdoor air $G''_{h,i}$ is introduced in a quantity $G_{\delta,i}$ equal to the bypassed volume. This secondary stream is controlled by an automatic flow stabilizer 6 to keep the supply flow constant.

The use of this heat recovery design significantly reduces material usage (e.g., less metal) and eliminates the need for thermal insulation. The system operates as follows at different times of the year.

In the summer design mode, when the outdoor temperature $t_{ext} = t_{int}$, the system operates as a direct-flow scheme. In this case, the recirculated flow $G_{\delta,i}$ and the secondary outdoor air intake $G''_{h,i}$ are both zero (the valves of controllers 5 and 6 on the bypass line are closed). The entire airflow $G'_{h,i}$ is supplied to the consumer, i.e., $G_c = G'_{h,i}$.

In the winter design mode, characterized by $t_{ext} = t_{ext}^w$, the system maintains an equal flow rate of recirculated air and outdoor air intake $G_{\delta,i} = G_c$.

In transitional seasons, when $t_{ext}^w < t_{ext} < t_{ext}^s$, variable components of the total outdoor airflow always meet the condition $G'_{h,i} + G''_{h,i} = G_c$ and the ratio of $G_{\delta,i}$ to $G'_{h,i}$ is adjusted such that the temperature at the inlet to the heat recovery unit remains constant and equal to $t_{int} = const$.

Based on the above conditions and using heat and mass balance equations, the following expressions can be derived to determine the key operating parameters of the system under consideration:

$$G_c = \frac{\alpha}{c} F \frac{\tau_{surf} - t_{ext}^s}{t_{ext}^s - t_{ext}^w}, \quad (1)$$

$$T = 2t_{ext}^s - t_{ext}^w, \quad (2)$$

$$\frac{G'_{h,i}}{G_c} = \frac{t_{h,i} - t_{ext}^w}{t_{ext}^s - t_{ext}^w}, \quad (3)$$

$$\frac{G''_{h,i}}{G_n} = \frac{t_h^n - t_h^i}{t_h^n - t_h^s}, \quad (4)$$

$$G_F = 2G_c. \quad (5)$$

Where:

α – heat transfer coefficient from the kiln surface to the outdoor air without a heat recovery device, $W/(m^2 \cdot K)$;

F – heat-emitting surface area, m^2 ;

c – specific heat capacity of air, $J/(kg \cdot K)$;

τ_{surf} – temperature of the heat-emitting surface, $^{\circ}C$;

t_{inl} – air temperature at the inlet to the heat recovery device, $^{\circ}C$;

t_{ext} – outdoor air temperature, $^{\circ}C$;

G_c – air flow rate delivered to the consumer, kg/s .

Taking the average value $\alpha \approx 30 W/(m^2 \cdot K)$ and dividing both parts of equation (1) by F , we obtain the specific air consumption q_{spec} , kg/s , for the heat recovery unit:

$$q_{y\delta} = 108 \frac{\tau_{surf} - t_{ext}^s}{t_{ext}^s - t_{ext}^w} \quad (6)$$

Fig. 3 shows a graph created using equations (2), (3), (4), (5) depending on the parameter φ , which characterizes the relative position of the current external air temperature on the entire scale of its calculated temperatures.

$$\varphi = \frac{t_{ext}^s - t_{ext}^i}{t_{ext}^s - t_{ext}^w} \quad (7)$$

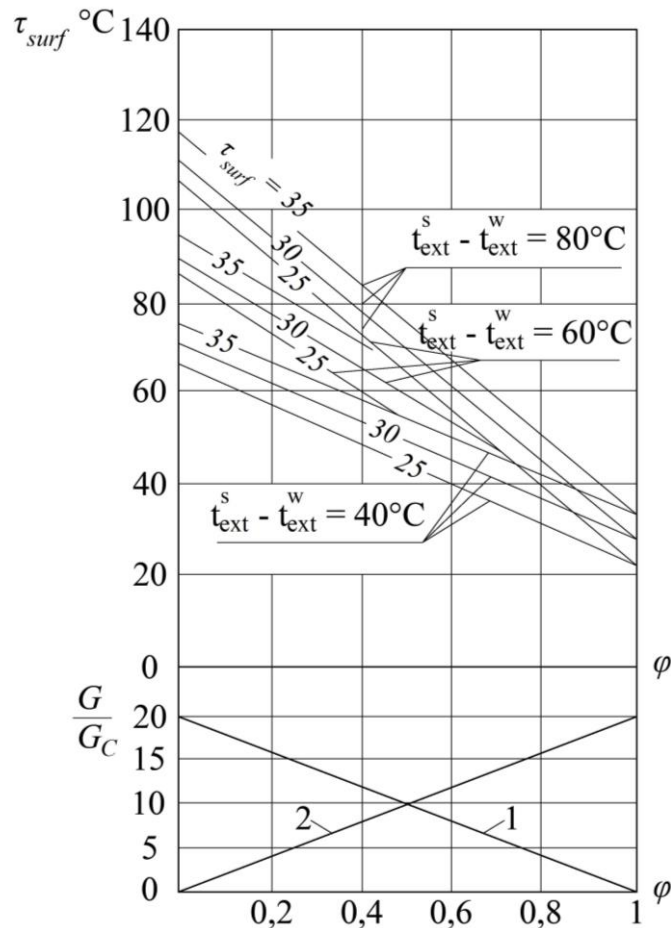


Fig. 3. Dependence of the main operating parameters of the waste disposal plant on the state of the outside temperature:

$$1 - \frac{G'_{h,i}}{G_c}; 2 - \frac{G''_{h,i}}{G_c}; \frac{G_{\delta,i}}{G_c}$$

From the graph, it is evident that with the same temperature on the kiln surface, the specific air flow rate increases in regions with milder climates, where the difference $t_{ext}^s - t_{ext}^w$ between summer and winter outdoor temperatures is smaller.

Conclusions. The principles of rational cooling of rotary kilns with heat recovery for industrial heat supply were formulated. Methods for stabilizing the thermal regime and the design conditions for functional layouts of kiln units were identified.

As a result of computational and analytical research, new dependencies and relationships were established to determine the key parameters of heat recovery systems for industrial heat supply, based on the stabilizing cooling of rotary kilns.

References

- [1] V.R. Serdyuk, "Tendentsii vyrobnytstva keramzytu ta vykorystannia keramzytobetonu v suchasnomu budivnytstvi", *Visnyk Vinnytskoho Politekhnicnoho Instytutu*, no. 3, pp. 14-23, 2018.
- [2] A. Boateng, *Rotary Kilns, Transport Phenomena and Transport Processes*. Elsevier Publication, Oxford, 2008.
- [3] V.Yu., Shcherbyna, D.H. Shvachko, "Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti obertovykh teplovykh ahrehativ", *Vcheni Zapisky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni Nauky*, vol. 29, no. 68, pp. 68-72, 2018.
- [4] V.Yu. Shcherbyna, D.H. Shvachko, "Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti obertovykh pechei za vykorystannia vohnetryviv z teploizolatsiieiu", *Visnyk Vinnytskoho Politekhnicnoho Instytutu*, no. 5, pp. 52-57, 2022.
- [5] V.D. Petrash, E.A. Geraskina, D.V. Basist, "Printsipy avtomaticheskoho rehulyrovaniia okhlazhdeniia vrashchaiushcheisia pechi s utilizatsiei energii dlia promyshlennoho teplosnabzheniia", *Visnyk ODABA*, vol. 20, pp. 302-306, 2005.
- [6] E.A. Geraskina, "Vzaimosviaz konstruktivnykh parametrov ukrytii teploistochnikov dlia obespecheniia rezhyma vozdukhostroinoi intensyfikatsii teploobmena na okhlazhdaemoi poverkhnosti", *Vestnik OGASA*, 2001, Issue 5, p. 25.
- [7] V.D. Petrash, *Teplosnabzhenie na osnove utilizatsii energii rehuliruemoho okhlazhdeniia vrashchaiushchikhsia pechei*. Odesa: VMV, 2006.
- [8] V.D. Petrash, I.V. Chernysheva, "Teplosnabzhenie na osnove intehratsii termotransformovanoi energii okhlazhdeniia pechi i nizkopotentsialnykh istochnikov", *Ventyliatsiia, osvittennia ta teplohazopostachannia*, vol. 16, pp. 84-92, 2012.
- [9] E.A. Geraskina, "Raschet elementov vozdukhoraspredeleniia v systemakh stabilizatsionnoho okhlazhdeniia teplovykh ahrehatov", *Tezy dop. XVI Mizhnarodnoi Naukovo-Praktychnoi Konferentsii: Informatsiini Tekhnologii, Nauka, Tekhnika, Tekhnologiiia, Osvita, Zdorovia*, Kharkiv: NTU KhPI, 2008, pp. 218-219.
- [10] V.S. Mikhailenko, V.D. Petrash, E.A. Geraskina, "Systema avtomaticheskoho rehulyrovaniia okhlazhdeniia vrashchaiushcheisia pechi, deistvuiushchaia na osnove printsypov nechetkoi lohiki", *Visnyk ODABA*, vol. 22, pp. 222-229, 2006.
- [11] V.D. Petrash, O.I. Khomenko, E.A. Geraskina, "Efektyvnist peretvorennia enerhii vid pytomoi vytraty povitria u systemi okholodzhennia pechi, shcho obertaietsia, dlia teplopostachannia", *Kholodylna Tekhnika ta Tekhnologii*, vol. 59, no. 3, pp. 205-214, 2023.
- [12] V. Petrash, I. Sorokina, D. Basist, Patent 88327 Ukrainy. *Systema stabilizuuchoho okholodzhennia pechi na osnovi termotransformatsii teploty, iaka utilizuietsia*: F27B 9/00, F25B 29/00, F27D 9/00, biul. no. 19, 3 p, publ. 12.10.2009.
- [13] V. Petrash, I. Sorokina, D. Basist, "Pidvyshchennia enerhotekhnolohichnoi efektyvnosti pechi, shcho obertaietsia, i yakosti teplopostachannia na osnovi termotransformatornoho tsykladu utilizatsii teploty", *Enerhotekhnologiiia i Resursozberezhennia*, no. 4, pp. 22-55, 2008.
- [14] V. Petrash, I. Chernysheva, "Teplopostachannia na osnovi intehratsii termotransformovanoi enerhii okholodzhennia pechi ta nyzkopotentsiinykh dzherel",

Ventylatsiia, osvittlenia ta teplozhazopostachannia, no. 16, 2012.

- [15] V.D. Petrash, V.P. Baryshev, L.F. Shevchenko, E.A. Geraskina, "Research of Energy Technological Parameters in the Processes of Heat Pump Utilization of Heat Exhaust Gases of Rotary Kilns", *Problemele Energeticii Regionale*, no. 2 (50), pp. 76-89, 2021.
- [16] V.D. Petrash, V.P. Baryshev, L.F. Shevchenko, E.A. Geraskina, M.V. Danichenko, "Perspective Ways of Energy-Efficient Modernization of Heat Supply Systems Based on Heat Pump Technologies", *Problems of the Regional Energetics*, no. 4 (56), pp. 47-60, 2022.

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ЗІ СТАБІЛІЗАЦІЄЮ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ОБЕРТОВИХ ПЕЧЕЙ

¹Гераскіна Е.А., к.т.н., доцент,
poselok@te.net.ua, ORCID: 0000-0002-3308-3776

¹Хоменко О.І., к.т.н., доцент,
olgahomenko_tgp@ukr.net, 0000-0002-2465-0273

¹Хоменко А.А., к.т.н., ст. викладач,
khomenko_odaba@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2580-9861
¹Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. Статтю присвячено проблемі підвищення ефективності використання опалювальних установок для промислового і комунального теплопостачання. Сформульовано принципи раціонального охолодження печей і будівельних матеріалів, визначено способи стабілізації теплового режиму і умови розробки функціональних схем для пічних агрегатів.

Обертіві випалювальні печі в умовах змінного впливу температури повітря, швидкості вітру, сонячного випромінювання і атмосферних опадів втрачають з бічної поверхні в навколишнє середовище до 30% теплоти. Несприятливий вплив зазначених факторів негативно відбивається на тепловому стані пічного агрегату з перегрівом в теплий і переохолодженням в холодний періоди року, а також знижує стійкість футерування і якість продукції. Характерно, що для підтримки необхідної температури на внутрішній поверхні печі і продовження терміну служби футерування, передбачається природне охолодження бічної поверхні агрегату. Це некерований процес з вищезазначеними недоліками.

Радикальним рішенням щодо забезпечення теплотехнологічних вимог і підвищення ефективності утилізації енергії палива, що спалюється, є організація регульованого охолодження обертової печі. Однією зі схем, що забезпечують необхідний відбір теплоти з поверхні печі, є схема з рециркуляційним каналом. Вона заснована на повторному використанні потоку теплоносія, рециркуляційна частина якого зростає зі зниженням температури зовнішнього повітря. У літньому розрахунковому режимі система працює як прямоточна і весь потік надходить до абонентських систем. У зимовому розрахунковому періоді поступає повітря з байпасної лінії.

З урахуванням вищезгаданих умов встановлено залежності для знаходження основних параметрів системи стабілізуючого охолодження обертової печі, яка використовується для комунально-побутового теплопостачання.

Ключові слова: обертова випалювальна піч, утилізація теплоти, промислове теплопостачання, повітряне охолодження, стабілізація теплового режиму.

Стаття надійшла до редакції 9.05.2025

[This work](#) © 2025 by [Geraskina E.A.](#), [Khomenko O.I.](#), [Khomenko A.A.](#) is licensed under

[CC BY 4.0](#)

**EFFICIENCY OF OPERATION OF EXTERNAL THERMAL INSULATION SYSTEMS
FROM THE POSITION OF THE EXPEDIENCY OF REPAIR WORK**

¹**Menelyuk O.**, Dr. Sc. (Tech.), Professor,
meneilyk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1007-309X

¹**Babii I.**, Ph.D., Associate Professor,
igor7617@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8650-1751

²**Kucherenko L.**, Ph.D., Associate Professor,
liliya13liliya13@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0348-3610

¹**Bichev I.**, Ph.D., Associate Professor,
bichev@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3000-2600

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

²*Vinnitsa Technical University*
95, Khmelnytskyi Highway, Vinnytsia, 21021, Ukraine

Abstract. As a result of the research, it was found that in the construction industry, when insulating external enclosing structures, in most cases, their effective operation over time takes a special place. In modern conditions, the issue of obtaining an economic effect from the operation of insulated buildings is of great importance. Insulation of building facades is carried out mainly by external thermal insulation systems with plaster finishing, and to a lesser extent, systems are used in which cladding is carried out by industrial elements with a ventilated air layer. For thermal insulation systems, it is important that the level of operational efficiency is not lower than the calculated one or is maintained within acceptable limits throughout the entire service life. It was established that when assessing economic efficiency according to the first option for short-lived technical systems, the condition must be met under which the cost of the new system would not exceed the cost of the outdated one. Since thermal insulation systems are structures of long-term operation, such a condition is difficult to fulfill due to the fact that the replacement of the layers of the system, as a rule, occurs after a certain specified time, which can reach up to 30 years. In this case, it is necessary to fulfill the requirement that the ratio of the cost of a new structure with the costs of performing the replacement to the designated service life would be less than the ratio of the cost of an outdated structure with the costs of its operation to the actual service life. It has been established that in order to make a rational decision on the further operation of the thermal insulation system, along with traditional methods of assessing the technical condition and developing recommendations for its further operation, it is necessary to perform an assessment of the economic effect when adopting a particular method of repair or restoration.

Keywords: enclosing structures, transparent facade systems, installation cost, selection criteria, expert evaluation method.

Relevance and statement of the problem. Thermal insulation of building facades is one of the main tasks of our time. The urgent need for mass insulation of building facades contributes to the creation of a separate direction in the construction industry of our country [1]. This is due to the complete non-compliance with regulatory requirements and world standards regarding the heat transfer resistance of the external structures of the majority of both public and residential buildings built since the middle of the last century and at the beginning of the current one [2-3]. Therefore, more and more attention should be paid to the problems of thermal insulation of modern buildings. Since in the conditions of an unstable economic situation there is an urgent need to promptly adjust the cost of both the insulation works themselves and the entire project as a whole [4-5]. Over the past decade, the park of enclosing structures used in new construction and thermal modernization has changed significantly. In addition, the

restoration of the external protective and decorative layer is part of the process of repairing insulated facades in order to ensure an attractive appearance of the building and protect the thermal insulation layer from the influence of external climatic factors. It should be especially noted that the repair of insulated facades maintains the effectiveness of the thermal insulation coating, ensures durability and improves the appearance of the building [6, 7].

Thermal modernization and repair of walls of residential buildings in operation is the most urgent problem of today and, probably, will be relevant for more than one year. Solving this problem requires a systematic approach with the involvement of state programs, for example, especially for buildings built from the middle of the last and at the beginning of the new century.

For insulation and thermal modernization of external walls of buildings in operation, the following technological solutions should be used: external insulation, insulation from the inside of the premises and insulation in the thickness of the enclosing structure, Fig. 1. However, each of these solutions requires certain operating conditions and subsequent costs for their repair. Therefore, before using a particular insulation system, it is necessary to clearly understand the operational cycle of each of them.



Fig. 1. Scheme of selection of thermal insulation systems for insulation and thermal modernization of facades

In modern conditions, the issue of obtaining an economic effect from the operation of insulated buildings is of great importance. However, it should be noted that houses that are in operation do not bring profit directly in monetary terms. Therefore, determining the profit that results from the operation of houses with effective thermal insulation that meets regulatory requirements is a difficult task. The approach to determining the efficiency of the operation of houses with facade thermal insulation systems should be based on the interpretation of the reduction in costs from the thermal insulation system that is in a state of "failure" as a conditional profit for the thermal insulation system that is in operation (excluding capital investments in its arrangement). Hence, when assessing the economic effect, the losses for bringing the thermal insulation system to a working condition should not exceed the reduction in profit losses from when the system is in a state of failure (Fig. 2), or the heat transfer resistance of the external enclosing structure has significantly decreased during operation.

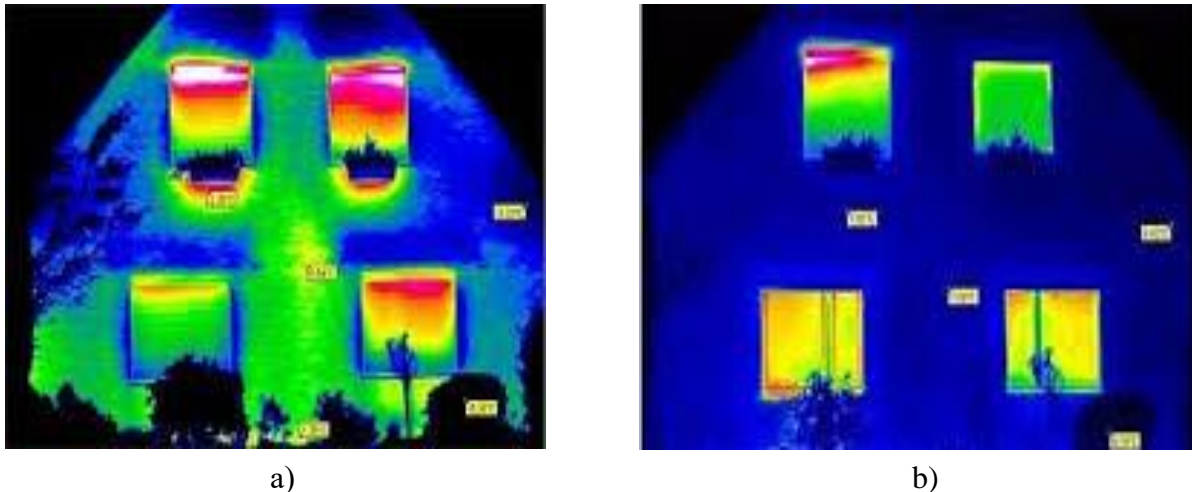


Fig. 2. Thermograms of the external wall of the house: a) the thermal insulation system of the house in a state of "failure" (light color indicates insufficient thermal insulation or its failure); b) the thermal insulation system of the house, which meets the requirements of regulatory documents (blue gradients show low surface temperature, which indicates good thermal insulation)

Analysis of recent research and publications. Recently, pre-project modeling of organizational and technological solutions has been considered interesting and necessary in order to reduce the cost of performing repair work on thermal insulation systems [5]. These and other problems in building insulation are the subject of the works of domestic scientists Farenjuk G., Meneilyuk O., Sokha V., Savyovsky V., Savytsky M., Shalenny V., Serdyuk V., Dudar I., Babii I., etc. Studies are being conducted on the dependence of technical and economic indicators of projects on the insulation of building facades [6, 9]. Various projects aimed at thermal modernization of existing buildings are being created and financed by state programs within the framework of supporting a sufficient level of energy efficiency. In our country, the insulation of building facades is carried out mainly by external thermal insulation systems with plaster finishing, for which the name of the bonded thermal insulation system (SSTI) is most often used. To a lesser extent, facade insulation, due to its higher cost, is carried out by cladding with industrial elements with a ventilated air layer, the so-called hinged ventilated facades (HVF) [10, 11]. However, these projects are not always effective, because not all optimization possibilities have been fully explored, both in the organization of projects and in the selection of technological solutions. This gives rise to scientific interest in researching these systems and their comparative analysis in determining the total cost of facade insulation, their operation and repair over time. In Ukraine, more than 256 million square meters of facade insulation have been completed since the beginning of the 21st century. However, as is known, the operational efficiency of facade systems is 20-25 years, depending on the type of insulation system [12]. Therefore, many facade systems currently require repair work. Moreover, this must be done both due to the end of the period of repair-free operation, and the need to repair the facade due to the loss of integrity and, as a result, the failure of the facade thermal insulation.

It is known that the reasons that determine the thermal modernization and repair of facade systems are various factors. Thus, based on the analysis of the results of the research, the following four types of failures in the thermal regime of building envelopes and the reasons for their occurrence have been established [13]:

1 – design (structural) failures, which are caused by imperfection or violation of design standards, which led to an unjustified choice of the level of thermal insulation of the elements of the thermal insulation shell, failure to analyze the structural features of the enclosures and, as a result, condensation on their inner surface or the accumulation of moisture in their thickness during the cold season, insufficient consideration of factors that affect the operational properties of structures or incorrect selection of design parameters of enclosure materials;

2 – technological (production) failures, which are caused by imperfection in the manufacture and installation of structures and, as a result, the influence of random factors (deviations from the design density of the thermal insulation layer, non-compliance with design solutions for sealing the butt joints of panels, elements, etc.) on the operational properties of the thermal insulation shell as a whole;

3 – operational (failures due to improper handling), which are caused by a decrease in the power of heating and ventilation systems, accidental soaking of structures, etc.;

4 – conceptual (system) failures, which are clearly associated with the imperfection of the regulatory framework, which establishes inadequate regulatory calculations of thermal indicators for modern structures and does not clearly regulate the rules and parameters of their assessment, design without establishing thermal reliability requirements for the main elements that form the thermal and humidity regime, and which can be eliminated only after reforming the regulatory framework for the design of thermal insulation structures of buildings [10].

Purpose and tasks. The purpose of the work is to determine the efficiency of operation of external thermal insulation systems from the standpoint of the feasibility of repair work. The main tasks are determined:

- to determine the criterion for the feasibility of repair or partial replacement of the main structural elements;
- to establish the costs associated with the replacement of the structure and its further operation.
- to determine the annual economic effect of the costs of complete replacement of the thermal insulation system or its repair.

Materials and methods of research. The research was carried out with the extensive use of systems analysis methods and statistical research, as well as field observations. The proposed methods made it possible to identify and build empirical dependencies.

Research results. It can be noted that most facade thermal insulation systems are those that can be repaired and restored. For such systems, the economic effect, according to [14, 15], is determined by two options:

- the economic effect of continuing the efficiency of the operation of the facade system;
- the economic effect of improving the quality of the facade system installation.

In the first option, the economic effect is associated with the replacement of the layers of the facade system and structures that are in a state of "failure" [8] with new ones. In the second option, high-quality modern materials and repair technologies are used. In order to assess which of the two options for repairing facade thermal insulation systems of operated structures is more effective and which one to take into action, it is necessary to determine the costs for both options, compare them and make a decision on the further operation of the system.

The criterion for the feasibility of replacing the system, according to [2], is the following expression:

$$\Delta E = (l_f - \sum_{i=1}^n \frac{C_{r_i}}{T_{es_i}}) \geq 0,$$

where ΔE – specific efficiency index;

l_f – specific (per accepted unit of time) possible losses due to «failure» of the thermal insulation system;

n – number of elements/layers of the structure to be replaced;

C_{r_i} – cost of replacing the i -th structural element, including the cost of performing the work and the cost of the element;

T_{es_i} – effective service life of the i -th structural element.

In the case of replacing a structure in a state of failure with a new one, the specific efficiency index must be higher than zero. This means that the new thermal insulation system must meet increased requirements for the quality of performance and the duration of its service life, i.e. contribute to the extension of the durability of the entire structure.

An indicator of the quality of the external thermal insulation system can be the ratio of the intended effective service life of the new thermal insulation system to the actual service life of the structure being operated.

$$Q = \frac{T_1}{T_0},$$

where T_1 – is the intended service life of the new thermal insulation system;

T_0 – is the actual service life of the outdated thermal insulation system.

When assessing the economic efficiency according to the first option for short-lived technical systems, the condition must be met under which the cost of the new system would not exceed the cost of the outdated one. Since thermal insulation systems are structures of long-term operation, such a condition is difficult to fulfill due to the fact that the replacement of the layers of the system, as a rule, occurs after a certain specified time, which can reach up to 28 years. In this case, it is necessary to fulfill the requirement under which the ratio of the cost of the new structure with the costs of performing the replacement to the intended service life would be less than the ratio of the cost of the outdated structure with the costs of its operation to the actual service life.

$$\frac{C_1}{T_1} \leq \frac{C_0}{T_0},$$

The costs associated with replacing the structure and its subsequent operation are determined by the following formula:

$$C_r = \left[K_l^0 + \sum_1^t \frac{C_t}{(1+S_{dt})^t} \geq 0 \right] \times k_{rs},$$

where K_l^0 – one-time costs for replacing system layers;

t – period in years since the production of the replacement structure;

$\frac{C_t}{(1+S_{dt})^t}$ – total depreciation deductions for the new design taking into account the deferral of costs at $t = 28$ years;

k_{rs} – number of system repairs made.

As is known, reliability is characterized by reliability, maintainability and preservation. For thermal insulation systems, it is important that throughout the entire service life the level of operational efficiency is not lower than the calculated one or is maintained within acceptable limits. And here the failure-free operation of the structure is of great importance. There are two ways to maintain the required level of reliability. First, during operation, the appearance of defects and damage should be minimal, which is associated with the quality of the design. Secondly, it is necessary to timely eliminate defects and damage by carrying out repairs, and also strive to increase the repair intervals. The criterion for the feasibility of repair or partial replacement of the main structural elements is the following expression:

$$\Delta C = C_n - C_f - \sum_{i=1}^n \frac{C_{ri}}{T_{pi}} \geq 0,$$

де ΔC – specific costs for restoring the working condition of all elements of the thermal insulation system.

The costs associated with the repair and restoration of facade thermal insulation systems and their further operation are determined by the formula:

$$C_f = \left[K_o^y + \sum_1^t \frac{C_t}{(1+S_{dt})^t} \geq 0 \right] \times S_{rf},$$

where K_o^y – one-time costs for the repair of the thermal insulation system;

t – period in years from the moment of the repair, which limits the summation of costs;

C_t – annual operating costs, including depreciation and standard costs for the current repair of the thermal insulation system;

S_{dt} – standard for reducing costs at different times, which is taken at 0.08 [15];

S_{rf} – percentage of the total area of repaired thermal insulation of facades.

After considering the options for operating the building, a comparison of the costs for the complete replacement of the thermal insulation system or its repair is performed. The option with lower costs is selected, and the annual economic effect is determined as the difference in costs.

$$Ec_{ef} = C_r - C_f.$$

The above are the main provisions for determining the economic effect of the operation of facade thermal insulation systems. When performing such a calculation in detail, multiple factors are taken into account that affect the process of both complete replacement and repair of the system.

Conclusions. Based on the above, we can conclude that in order to make a rational decision on the further operation of the thermal insulation system, along with traditional methods of assessing the technical condition and developing recommendations for its further operation, it is necessary to also assess the economic effect when adopting a particular method of repair or restoration. This approach will significantly increase operational efficiency and extend the period of repair-free operation of facade thermal insulation systems, and will also allow for the targeted use of funds that are annually allocated to maintain them in working condition.

References

- [1] Zhilishchnyy fond Ukrainy v 2017 godu. Statisticheskyy byulleten'. Gosudarstvennyy komitet statistiki. Kiyev, 2017.
- [2] G.G. Farenjuk, G.M. Ageyeva, "Osobennosti otsenki energoeffektivnosti proyektov zhilykh domov", *Energoberezheniye. Energetika. Energoaudit*, no. 5 (75), pp. 13-17, 2010.
- [3] DBN V.2.6-31:2021. Teplovaya izolyatsiya i energoeffektivnost' postroyek. Kiyev: Ministerstvo regional'nogo razvitiya, stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Ukrainy, 2022.
- [4] A.I. Meneilyuk, I.S. Chernov, L.V. Lobakova, "Vybor effektivnykh modeley realizatsii proyektov v usloviyakh izmenyayushcheyasya finansovoy situatsii", *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta KHPI. Khar'kov*, 2014, pp. 71-75.
- [5] Zeljko Kos, Ihor Babii, Iryna Grynyova, Oleksii Nikiforov, "Ensuring the Energy Efficiency of Buildings through the Simulation of Structural, Organizational, and Technological Solutions for Facade Insulation", *MDPI Journals «Applied Sciences»*, vol. 14, Issue 2, pp. 801, 2024.
- [6] I. Babii, I. Bichev, I. Chernov, N. Pisarchuk, L. Kucherenko, "Analiz faktorov influencing the integrity insulated facades of houses and search for methods of their repair", *Sovremennoye stroitel'stvo i arhitektura*, vyp. no. 8, pp. 110-119, 2024.
- [7] A.P. Siciliano, X. Zhao, R. Fedderwitz, K. Ramakrishnan, J. Dai, A. Gong, J.Y. Zhu, J. Kośny, L. Hu, "Sustainable wood-waste-based thermal insulation foam for building energy efficiency", *Buildings*, 13, 840, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13040840>.
- [8] G. Farenjuk, "The determination of the thermal reliability criterion for building envelope structures", *Technical Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 129-133, 2019.
- [9] I.M. Babiy, A.I. Kaminskaya-Pinayeva, "Optimizatsiya proyekta uteplyeniya doma sistemoy ventiliruyemogo fasada na osnove eksperimental'no-statisticheskogo modelirovaniya", *Sovremennyye tekhnologii, materialy i konstruksii v stroitel'stve*, no. 2(21), pp. 25-31, 2016.
- [10] V.V. Chernyavskiy, O.I. Yurin, G.G. Farenjuk, "Teploizolyatsionno-otdelochnyye fasadnyye sistemy kak sredstvo termomodernizatsii zhilishchnogo fonda Ukrainy", *Resursno-ekonomnyye materialy, konstruksii, zdaniya i sooruzheniya*, vyp. 17, pp. 365–372, 2008.
- [11] O.I. Meneiliuk, I.M. Babii, H.D. Bochorishvili, K.I. Bochevar, *Materialy ta tekhnologii izoliatsiinykh robit v budivnytstvi: monohrafiia*. Odesa: Vydavnytstvo FOP Bondarenko M.O., 2020.
- [12] V. Sokha, "Naukovo-metodychni osnovy pidvyshchennia ekspluatatsiinoi efektyvnosti tekhnolohichnykh system teploizoliatsii fasadiv", avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya d-ra tekhn. nauk: 05.23.05, Odes'ka derzhavna akademiya budivnictva ta arhitekturi. Odessa, 2004.

- [13] G.G. Farenjuk, "Klassifikatsiya i struktura teplovykh otkazov izolyatsionnoy obolochki zhilykh i obshchestvennykh zdaniy", *Stroitel'stvo Ukrainy*, no. 10, pp. 32 – 34, 2008.
- [14] V.A. Pashinskiy, *Osnovy teorii nadezhnosti zdaniy i sooruzheniy: uchebnoye posobiye dlya studentov stroitel'nykh spetsial'nostey vsekh form obucheniya*. Kirovograd: KNTU, 2016.
- [15] V.I. Solomko, V.L. Gorobets, V.I. Borshchev, "Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh proletnykh stroyeniy mostov i opredeleniye ob'yema i struktury ikh tekushchego soderzhaniya", *Vestnik Dnepropetrovsk. nats. univer. zhelezn. tr-tu im. ak. V. Lazaryano*, vyp. 6, pp. 180-186, 2005.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗОВНІШНІХ СИСТЕМ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ З ПОЗИЦІЇ ДОЦІЛЬНОСТІ РЕМОНТНИХ РОБІТ

¹Менейлюк О.І., д.т.н., професор,
meneilyuk@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1007-309X

¹Бабій І.М., к.т.н., доцент,
igor7617@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8650-1751

²Кучеренко Л.В., к.т.н., доцент,
liliya13liliya13@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0348-3610

¹Бічев І.К., к.т.н., доцент,
bichev@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3000-2600

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

²Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе 95, м. Вінниця, 21021, Україна

Анотація. У результаті досліджень встановлено, що в будівельній галузі при утепленні зовнішніх огорожувальних конструкцій у більшості випадків особливе місце займає їх ефективна експлуатація в часі. У сучасних умовах велике значення має питання отримання економічного ефекту від експлуатації утеплених будівель. Утеплення фасадів будівель здійснюється переважно зовнішніми теплоізоляційними системами з обробкою штукатурками, та в меншому об'ємі використовуються системи, в яких здійснюється облицюванням індустріальними елементами з повітряним шаром, що вентилується. Для систем теплоізоляції важливо щоб протягом усього терміну служби рівень експлуатаційної ефективності не був нижчим за розрахунковий або зберігався в допустимих межах. Встановлено, що при оцінці економічної ефективності за першим варіантом для недовгочасних технічних систем має дотримуватися умова, за якої вартість нової системи не перевищувала б вартості застарілої. Оскільки системи теплоізоляції є конструкціями тривалої експлуатації, таку умову виконати важко через те, що заміна шарів системи, як правило, відбувається через певний визначений час, який може сягати до 28 років. У такому разі, необхідне виконання вимоги при якому відношення вартості нової конструкції з витратами на виконання заміни до призначеного терміну служби було б меншим від відношення вартості застарілої конструкції з витратами на її експлуатацію до фактичного терміну служби. Встановлено, що для прийняття раціонального рішення щодо подальшої експлуатації системи теплоізоляції, поряд з традиційними методами оцінки технічного стану та розробкою рекомендацій щодо її подальшої експлуатації, необхідно виконувати і оцінку економічного ефекту при прийнятті того чи іншого способу ремонту чи відновлення.

Ключові слова: огорожувальні конструкції, теплоізоляція фасадів, економічна ефективність, ремонт фасадів, вартість влаштування.

Стаття надійшла до редакції 02.05.2025

This work © 2025 by Meneylyuk O., Babii I., Kucherenko L., Bichev I. is licensed under CC BY 4.0

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ у збірнику наукових праць “Сучасне будівництво та архітектура”

До опублікування у фаховій збірці наукових праць приймаються раніше не опубліковані наукові статті, із зазначеною нижче **тематикою публікацій**:

1. Архітектура.
2. Будівельні конструкції.
3. Будівельні матеріали та технології.
4. Гідротехнічне та транспортне будівництво.
5. Інженерні мережі та обладнання.
6. Основи та фундаменти.
7. Технологія та організація будівельного виробництва.

Стаття повинна відповідати тематиці збірника, публікуватися вперше і включати такі елементи:

- актуальність та постановку проблеми у загальному вигляді, її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;
- аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких представлено вирішення даної проблеми і на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується дана стаття;
- формулювання мети статті (постановка завдання);
- виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів;
- висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку у даному напрямку;
- список літератури.

Загальні вимоги до оформлення тексту

Статті подаються в електронному вигляді файлом Word 97 – 2003 в форматі .doc. Назва файлу має містити номер тематики публікації та прізвище першого автора (наприклад, 5 Іванов.doc).

Статті подаються українською чи англійською мовою і друкуються мовою оригіналу.

Текстова частина статті набирається на аркушах формату **A4** шрифтом **Times New Roman 12 пт** через одинарний інтервал, вирівнюється по ширині сторінки, поля по 2 см з усіх боків, абзацний відступ – 1,0 см. **Обсяг статті 7-16 повних сторінок разом з анотаціями.**

Структура статті:

- **індекс УДК** (вирівняно по лівому краю без абзацного відступу, прописний, напівжирний);
- **назва статті** (відцентрована, усі літери прописні, напівжирні, переноси не допускаються);
- **прізвище, ініціали всіх авторів, науковий ступінь, вчене звання** (вирівняно по правому краю, прізвище – напівжирний; ступінь і звання – рядковий);
- **повна назва вищого навчального закладу чи організації** (курсив, вирівняно по правому краю; якщо автори з різних навчальних закладів, то кожен автор з окремого рядка);

- *електрона пошта* (вирівняно по правому краю та поряд унікальний номер ORCID);
- *анотації до статті* (абзацний відступ, назва напівжирна, анотації пишуться двома мовами: українською і англійською).

Текст першої анотації пишеться мовою основного тексту статті та повинен бути **не менш як 1800 знаків**.

Текст другої анотації, якщо видання не є повністю англійськомовним, кожна публікація не англійською мовою супроводжується анотацією англійською мовою обсягом **не менш як 1800 знаків**. Якщо видання не є повністю українськомовним, кожна публікація не українською мовою супроводжується анотацією українською мовою обсягом **не менш як 1800 знаків**. Друга анотація розміщується в кінці статті після списку літератури на англійській мові.

Дві анотації повинні коротко повторювати структуру статті, що включає вступ, мету, методику, результати, висновок. Машинний переклад **не дозволяється**.

- *ключові слова* (міжрядковий інтервал не робиться, абзацний відступ, назва напівжирна, текст ключових слів не більше 6–8 слів).

Назва статі, прізвище і ініціали, науковий ступінь, вчене звання, місце роботи, анотація і ключові слова – повторюються українською та англійською мовами.

Між рядками з індексом УДК, назвою статі, прізвищем авторів, анотацією, основним текстом і переліком літератури, літературою на англійській мові та другою анотацією одинарний інтервал.

- *Основний текст статті*.

Структура основного тексту статті згідно з постановою ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 р. (Бюлетень ВАК України №1, 2003 р.) повинна мати такі необхідні елементи (*назви структурних елементів в тексті статті потрібно виділити напівжирно*):

- вступ (постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями);

– аналіз останніх джерел досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми (бажано, щоб це був аналіз останніх публікацій у фахових журналах) і на які опирається автор, виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття;

- постановка мети та завдання (формулювання мети та завдань досліджень);

– матеріали та методи дослідження (опис використаних матеріалів та методів дослідження проблеми, що розглядається у статті);

– основний матеріал і результати (виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів);

– висновки (наукова новизна, наукове та практичне значення результатів дослідження, перспективи подальших наукових розроблень);

– *література* (відцентрована, напівжирна; посилання в тексті подають у квадратних дужках [2]; список літератури наводиться відповідно порядку посилань у тексті згідно з ДСТУ 8302:2015 та записується в стовпчик; написання «Джерела інформації», «Перелік літератури» **не допускається**). Бібліографічний список наводиться мовою оригіналу та транслітерується. Кількість посилань на літературні джерела у статті повинно бути не менше 15 джерел. Особлива увага приділяється сучасним англійськомовним статтям, зокрема індексованих WoS або Scopus.

– *бібліографічний список (References)*. Для відтворення українських власних назв засобами англійської мови при перекладі публікації англійською мовою застосовується транслітерація. Найменування організацій та установ, що не перекладаються на англійську мову, також транслітеруються. Транслітерація прізвищ авторів виконується залежно від мови оригіналу джерела відповідно до вимог Постанови Кабінету Міністрів України від 27.01.2010 р. № 55 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею». Бібліографічний список повинен бути оформлений з використанням стилю *IEEE STYLE* згідно з «Міжнародним стилем цитування та посилання в наукових роботах», Київ, 2016.

Таблиці слід виконувати в редакторах Word без заливання. Кожна таблиця має бути надрукована з відповідним заголовком та нумерацією після першого посилання на неї.

Ширина таблиць не повинна перевищувати поля сторінки. Шрифт в таблиці повинен відповідати шрифту статті.

Формули мають бути виконані в редакторі формул *Equation 3.0* чи *MathType* з використанням тільки загальноприйнятих шрифтів (Times New Roman; Symbol). Кожна формула набирається як один об'єкт, нумерація формул арабськими цифрами справа в дужках вирівняна по ширині сторінки.

Рисунки (діаграми, фото), подаються у чорно-білому, кольоровому варіанті або у градаціях сірого кольору після першого посилання на них; мають бути згруповані та являти собою один графічний об'єкт; мати нумерацію та підпис позначення ось координат. Розміри підписів на рисунку повинні відповідати шрифту Times New Roman 12 пт.

Разом зі статтею подаються:

- відомості про автора (авторська довідка): прізвище, ім'я, по батькові (повністю); вчене звання, вчений ступінь; посада, місце роботи; контактні адреси й телефони; поштова адреса, на яку надсилати примірник збірника
- рецензія на статтю, якщо автором є аспірант без співавторів з вченим ступенем та вченим званням.

Статті, які не відповідають наведеним вимогам, до розгляду не приймаються.

Подані матеріали підлягають додатковому рецензуванню членами редколегії або провідними фахівцями за науковими напрямками, тому можуть бути повернені авторам на доопрацювання.

Остаточне рішення щодо публікації статті приймає редакційна колегія видання.

Відхилений оригінал не повертається.

Оплата здійснюється тільки після підтвердження прийняття статті до друку.

Вартість публікації статті **1100 грн**. Збірник виходить 4 рази на рік щоквартально, в кінці кожного кварталу. Статті необхідно надсилати до 1 числа останнього кварталу (наприклад, якщо збірник виходить в кінці червня, то статті приймаються до 1 червня). Але прийом статей може закінчитись раніше вказаного терміну, якщо буде набрано необхідну кількість сторінок.

Матеріали надсилати за адресою:

Редакція «Сучасне будівництво та архітектура»
Одеська державна академія будівництва та архітектури,
вул. Дідрихсона, 4
м. Одеса, 65029, Україна
Контактна особа: Антонюк Надія Романівна
тел. роб. (048) 70-00-608
e-mail: visnuk_odaba@ogasa.org.ua
Сайт збірника: <http://visnyk-odaba.org.ua/>

Платіжні реквізити:

Центр НТТМ по АБ, код **21028281**,
МФО **320478**, Р/р **UA 10320478000026009924861812** в ПАТ АБ «Укргазбанк»,
Призначення платежу: «Сучасне будівництво та архітектура, ПІБ першого автора»

Просимо після відправлення матеріалів обов'язково зателефонувати або зв'язатися електронною поштою, щоб упевнитися в отриманні матеріалів та рішенні редакційної колегії щодо публікації статті.

Наукове видання

СУЧАСНЕ БУДІВНИЦТВО ТА АРХІТЕКТУРА

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

**Випуск № 12
червень 2025**

Головний редактор *Вировой В.М.*
Технічний редактор *Антонюк Н.Р.*

Підписано до друку 30.06.2025 р.
Формат 60×84/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Цифровий друк. Ум.-друк. арк. 16,2.
Наклад 100 прим. Зам. №20-29Е

Видавець і виготовлювач:
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Свідоцтво ДК № 4515 від 01.04.2013 р.
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.
тел. (048) 729-85-34, e-mail: rio@odaba.edu.ua

Надруковано в авторській редакції з готового оригінал-макету
в редакційно-видавничому відділі ОДАБА