

**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 № 8  
червень 2024**

***ОДЕСА 2024***

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

Випуск № 8, червень 2024

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Редакційна колегія:**

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

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

**Карпюк В.М.** – д-р техн. наук, проф., ОДАБА;

**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);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Технічна редакція:**

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

Рекомендовано до видання Вченою радою ОДАБА

Протокол № 12 від 4.07.2024 р.

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

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

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

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

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

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESSA STATE ACADEMY  
OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

***MODERN CONSTRUCTION  
AND ARCHITECTURE***

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS**

**Issue № 8  
June 2024**

***ODESSA 2024***

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

Issue № 8, June 2024

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Editorial Board:**

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

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

**Karpiuk V.M.** – D.Sc., Professor, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Kozina Goran** – Professor, University North, Croatia;

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

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

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

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

**Technical editorship:**

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

Recommended for publication by the Academic Board of the OSACEA

*Protocol № 12, 4 July, 2024.*

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

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

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

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

## ЗМІСТ

### АРХІТЕКТУРА

**Смадич І.П.**

Дослідження характеристик комфорту інтер'єру багатоквартирних житлових будинків для різних типів особистості..... 7

### БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

**Дауров М.К., Білик А.С., Нужний В.В., Шосталь В.С.**

Механізми руйнування сталевих каркасів багатоповерхових будівель при пожежі..... 22

**Срібняк Н.М., Циганенко Л.А., Галушка С.А. Циганенко Г.М.**

Дослідження роботи структурної плити покриття..... 30

### БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

**Барабаш І.В., Давідчук В.Г., Стрельцов К.О.**

Механохімічна активація портландцементу і її вплив на термо-механічні характеристики цементно-водних композицій та розчинів на їх основі..... 43

**Гара О.А., Колесников А.В., Семенова С.В., Олійник Т.П.**

Оптимізація ефектів прискороного карбонізаційного тверднення керамзитобетону..... 50

**Кровяков С.О., Фіногенов О.І.**

Порівняння ефективності суперпластифікаторів в бетонах жорстких дорожніх покриттів.. 65

**Трикоз Л.В., Камчатна С.М., Зінченко О.С., Пустовойтова О.М., Бородін Д.Ю.**

Дослідження міцності і деформацій композиційних матеріалів на основі наповнених полімерів..... 72

### ІНЖЕНЕРНІ МЕРЕЖІ ТА ОБЛАДНАННЯ

**Петраш В.Д., Баришев В.П., Шевченко Л.Ф., Гераскіна Е.О., Голубенко А.В.**

Ефективність децентралізованого теплопостачання на основі традиційних генераторів теплоти з парокompресійною трансформацією енергії низькотемпературних джерел..... 80

### ОСНОВИ ТА ФУНДАМЕНТИ

**Осадчий В.С., Анісімов К.І., Бааджи В.Г., Великий Д.І.**

Протизсувні заходи ділянки схилу Одеського узбережжя..... 89

### ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

**Алейнікова А.І., Гулевський П.Ю., Оробей В.В.**

Методи відновлення багатоповерхових житлових будинків в сучасній Україні..... 102

**Бабій І.М., Бічев І.К., Чернов І.С., Писарчук Н.С., Кучеренко Л.В.**

Аналіз факторів, що впливають на цілісність утеплених фасадів будинків та пошук методів їх ремонту..... 110

**Кирилюк С.В., Чернов І.С., Кирилюк А.В.**

Адгезія при використанні часткового торкретування мобільною установкою..... 120

**Вимоги до оформлення статей у збірнику Сучасне будівництво та архітектура..... 128**

## CONTENTS

### *ARCHITECTURE*

#### **Smadych I.P.**

Research of characteristics of interior comfort of multi-apartment residential buildings for different personality types..... 7

### *BUILDING STRUCTURES*

#### **Daurov M.K., Bilyk A.S., Nyzhnyy V.V., Shostal V.S.**

The multi-storey buildings steel frames progressive collapse mechanisms in fire..... 22

#### **Sribniak N.M., Tsyhanenko L.A., Halushka S.A., Tsyhanenko H.M.**

Structural slab operation study..... 30

### *BUILDING MATERIALS AND TECHNIQUES*

#### **Barabash I.V., Davidchuk V.G., Streltsov K.A.**

Mechanochemical activation of portland cement and its influence on the thermomechanical characteristics of cement-water compositions and solutions based on them..... 43

#### **Gara O.A., Kolesnykov A.V., Semenova S.V., Oliinyk T.P.**

Optimization of accelerated carbonization hardening effects of expanded clay concrete..... 50

#### **Kroviakov S.O., Finohenov O.I.**

Comparison of the effectiveness of superplasticizers in concretes for rigid pavement..... 65

#### **Trykoz L.V., Kamchatna S.M., Zinchenko O.S., Pustovoitova O.M., Borodin D.Y.**

Study of strength and strains of composite materials based on filled polymers..... 72

### *UTILITY NETWORKS AND FACILITIES*

#### **Petrash V.D., Baryshev V.P., Shevchenko L.F., Geraskina E.A., Golubenko A.V.**

Effectiveness of decentralized heat supply based on traditional heat generators with vapor compression energy transformation of low-temperature sources..... 80

### *BASEMENT AND FOUNDATIONS*

#### **Osadchy V.S., Anisimov K.I., Baadzhi V.G., Velykyi D.I.**

Anti-landslide measures of the section of the slope of the Odessa coast..... 89

### *TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF BUILDING PRODUCTION*

#### **Aleynikova A., Hulievskyi P., Orobei V.**

Methods of renovation of multi-story residential buildings in modern Ukraine..... 102

#### **Babii I., Bichev I., Chernov I., Pysarchuk N., Kucherenko L.**

Analysis of factors influencing the integrity of insulated facades of houses and search for methods of their repair..... 110

#### **Kyryliuk S.V., Chernov I.S., Kyryliuk A.V.**

Adhesion when using partial shotcrete with mobile equipment..... 120

**Requirements for the articles formation in collection Modern construction and architecture** 128

**RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF INTERIOR COMFORT OF MULTI-APARTMENT RESIDENTIAL BUILDINGS FOR DIFFERENT PERSONALITY TYPES**

**Smadych I.P.**, PhD, candidate of Architecture,  
info@Smadych.com, ORCID: 0000-0001-7964-57301  
*Institute of Architecture, Construction, and Power Engineering,  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
st. Karpatska 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine*

**Abstract.** During the period of quarantine restrictions, and later the full-scale invasion of Russia into the territory of Ukraine, issues related to the change of residence intensified, accordingly changes in the level of social communications, problems of comfort, and realization of all vital functions in the living space of apartment buildings. The main purpose of the article is to study the relationship between the architectural characteristics of comfort in the interior of a residential apartment and the personality types of residents. The subject of our research is the architectural and spatial characteristics of the comfort of a residential apartment. The analysis of scientific research in the field of psycho-design and socio-design indicates the stratification of human personality types into 4 types, which realize all their vital functions in the "field of life". Another area of research focuses on finding the most integrated characteristics of the interior of the living space. These characteristics include size, shape, color, and details.

The main research method is the construction of a two-component matrix, with the help of which it is possible to determine the relationships between the components of the interior of the dwelling and the level of comfort for its residents. As a result of the analysis and evaluation of the concept of interaction of socio-psychological features of character and the corresponding architectural and spatial characteristics of comfort depending on the type of personality, practical recommendations have been formulated that can be applied in the process of pre-project analysis and at the stage of creating architectural and planning decisions of apartments and creating interior design. Experimental verification of the results obtained in the process of creating the interior design of several residential apartments in Ivano-Frankivsk shows that the level of comfort of residential apartments where the algorithms of this study were applied is significantly higher than in architectural and planning decisions where this methodology was not used.

**Keywords:** interior design, socio-psychological comfort of housing, characteristics of the living field, apartment buildings, comfort of residential apartment, parameters of housing comfort.

**Introduction.** During the quarantine period most people need to stay at home for a long time and adapt the space of the apartment to the various needs of the life cycle. Along with the change of social communications and psychological resilience, the problems of comfort and realization of all vital functions in the living space of the apartment become a priority [1]. During a constant stay in a small room, the problem of inconsistency of interior and planning decisions of housing to the needs of an individual or family is felt very acutely and has a negative impact on the "psychological climate" [2]. As a result, a number of publications in architecture and design 2019-2021 are devoted to solving the problems of psychodesign [3-4] – providing a comfortable living environment in accordance with the social, economic and psychological characteristics of a particular person or group of people and their consideration of design decisions. Scientists point to significant differences in the comfort of housing for people of different nationalities and cultures as a result of the evolution of geometric, stylistic, volumetric-spatial and functional features of different regions of the world [5-7].

**The main purpose of this article** is to study the relationship between the architectural characteristics of comfort in the interior of a residential apartment and the residents' personality types.

**Analysis of recent research.** In the context of this study, an important field is a comprehensive analysis of the functional features of housing and assessment of the interaction of architectural-planning, volumetric-spatial and color features, interior design of a residential apartment with the most stable socio-psychological characteristics. Such characteristics include the type of personality, as the most stable innate psychological structure of man, which regulates human thinking and behavior (Freudenstein et al., 2019). Despite the many approaches to the interpretation and study of personality types and human archetype, the results of researchers from Northwestern University in Illinois, USA are used in this study (Gerlach et al., 2018). As a result of a survey of 1.5 million people, scientists have identified that depending on the level of influence on the behavior of certain human characteristics, there are 4 types of personality: changeable, leader, egocentric and closed (Figure 1).

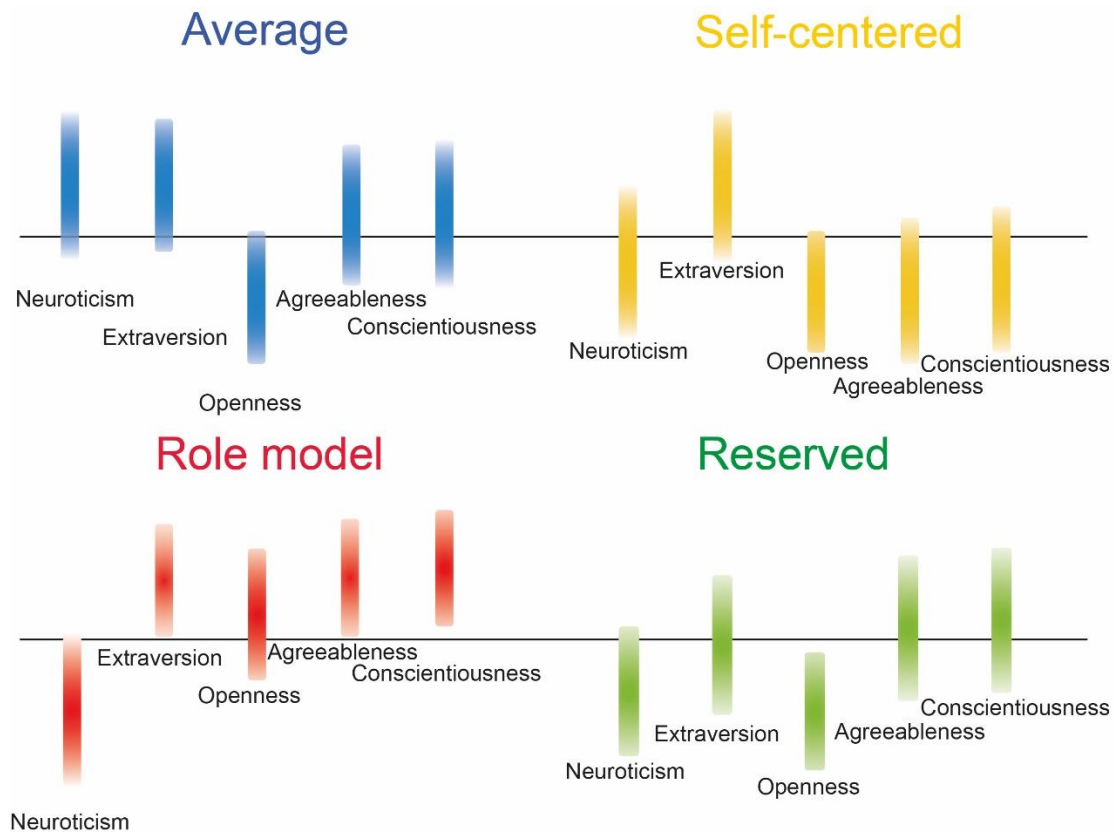


Fig. 1. Types of personality (source: Gerlach et al., 2019)

Scientists agree that "housing is the lowest level of living environment, where in one way or another all aspects of human life are realized" [8]. Graham L.T. in his research introduces the concept of the life field – the main functional components of life that are inherent in each individual [9]. This term, in contrast to vital functions, covers human behavior in the environment and allows to use these provisions for architectural research more fully. Based on data from studies of architectural sociology and psychology [10-12] Graham L.T. empirically analyzes the realization of the living field in some residential buildings in the USA and identifies a number of key components of the human living field – recreation, activity, intimacy, values, social ties, preferences (Figure 2).

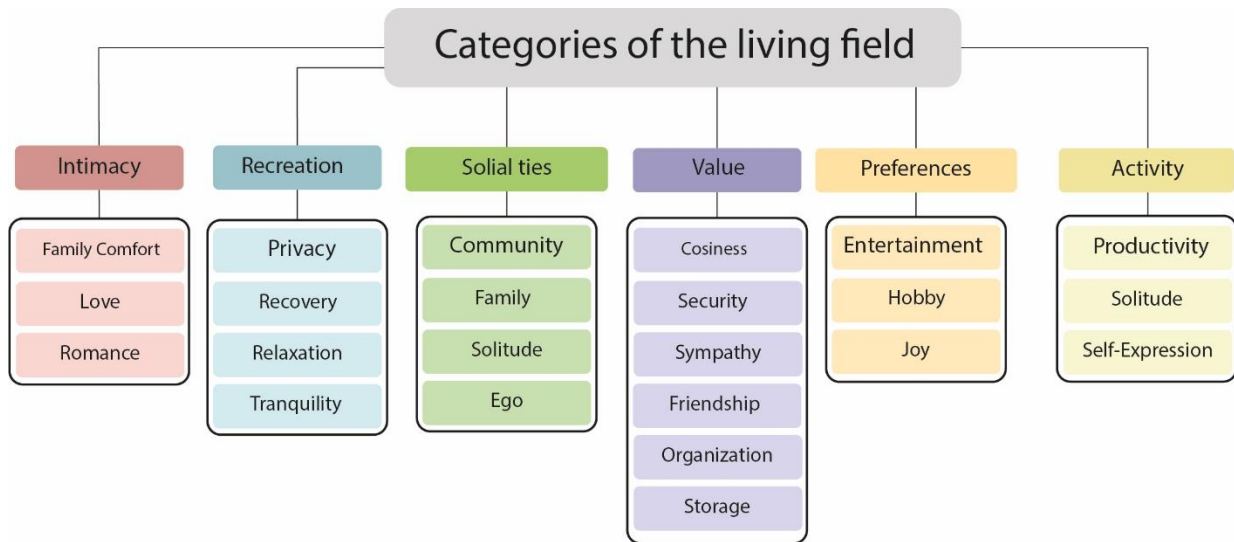


Fig. 2. Categories of the living field (source: Graham et al.,2015)

Undoubtedly, each person’s manifestation of these elements of the life field has different levels of priority, depending on lifestyle, life experience, etc. It has an impact on interior design and the formation of common features of housing, which can form a mental image of the owner (so-called informal types of "bachelor apartments", "retirement apartments", "workers’ apartments", etc.) [13, 14]. Based on the results of research of L.T. Graham and others, an interpreted scheme of implementation of the components of the living field in different types of apartments in multi-storey residential buildings in Ukraine is formed (Figure 3).



Fig. 3. Implementation of components of the living field in apartment buildings (source: compiled by the Author)

This analysis is based on typical planning decisions of residential apartments. The recommended area for apartments according to the State Building Codes of Ukraine is taken as the normative area of the sample:

- apartments with 1 living space (bedroom) – 35-40 m<sup>2</sup>;
- two-room apartments – 48-58 m<sup>2</sup>;
- three-room apartments – 65-70 m<sup>2</sup>.

In contrast to individual residential buildings, where most of the premises have a priority function, in multi-apartment residential buildings, due to lack of space, multifunctional use of rooms is by zoning space. With the increase of the number of living rooms, this multi-component of the living field is preserved, but there is a priority of 1-2 vital functions. It should also be understood that the concept of a private backyard of individual houses, which function as areas of recreation and social ties, in the apartments of apartment buildings are leveled, and their implementation is concentrated in other rooms or adjacent areas. This model demonstrates the typical implementation of the components of the living space in different rooms and may differ depending on the number and age of family members, their employment, as well as the characteristics of apartments: area, number of rooms, insulation, orientation and planning.

1. Characteristics of elements of socio-psychological comfort of a residential apartment.

Scientific models that describe the social aspects of interior design have a two-component structure, which combines the characteristics of human life and architectural and functional features of the studied space. In this study the socio-psychological characteristics of the residents of the apartment are represented by the most universal characteristics – the archetype of personality (1). Characteristics of the archetype of inhabitants (1.1) allows us to identify the most stable signs of comfort for different personality types. Functional features of the behavior of residents in the interior of a residential apartment are analyzed through the system of living space, or psycho-functional use of space (2) and its characteristics (2.1). At the same time, the analysis is based on the most integrated architectural and spatial characteristics of the room, the choice and change of which affect the comfort of residents (Figure 4).

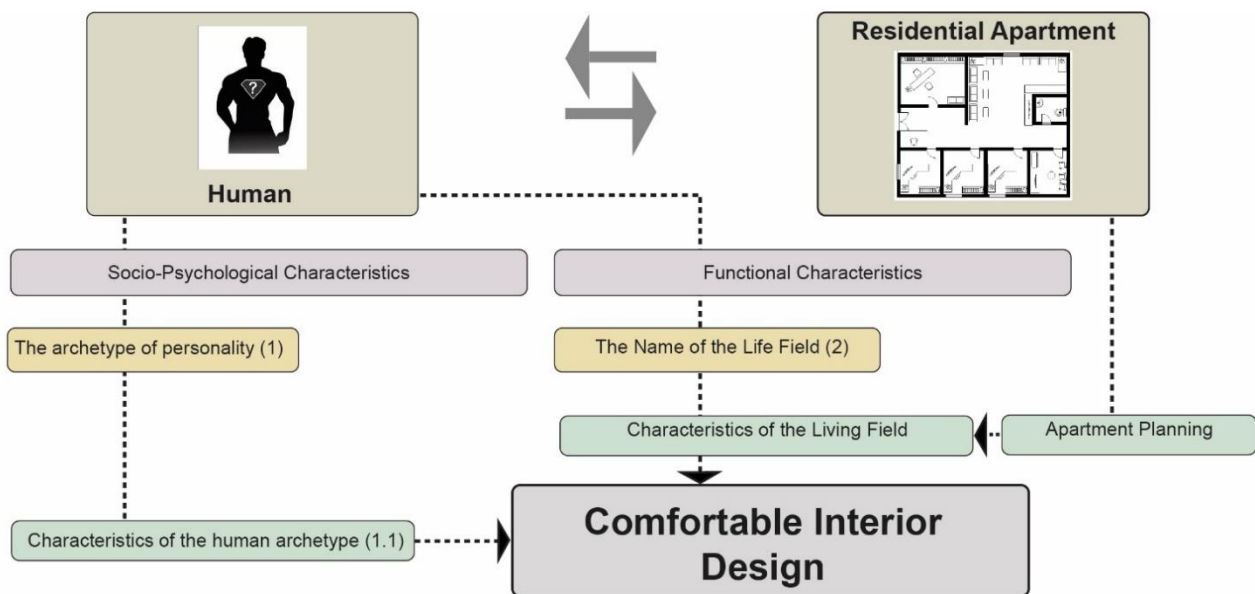


Fig. 4. The general model of providing comfort in the interior of a residential apartment (source: Author)

The main method of research is the analysis and evaluation of a two-component matrix, which can clearly represent the relationships that exist between personality types and design elements of a residential apartment. Theoretical studies by N. Ghosh, S. Castell and others are devoted to the study of the most common features that describe the architectural space of the room [15, 16]. Various authors identify from 4 to 7 basic architectural elements of interior design, such as space, line, shape, light, color, texture and pattern. In this study a 4-component structure of interior features was used, namely: *size, shape, detail and color*.

Size – indicators of 3-dimensional space, describing the physical dimensions of the room. In this case, using derivatives of interior design (such as light or color), you can visually change the size of the space at constant actual dimensions. Derivatives of size are the concept of scale or "space of the room" [17].

Form – the physical parameters of the room and all the elements in it. Hussein M. F. in his research singles out form as one of the primary links in the perception of the interior, where the line serves as a derivative of the means of creating form [18]. It is the form that has the most common features that characterize both the whole space as a whole and its individual elements. Light is an important secondary element that changes the visual characteristics of the space depending on the designer's idea. However, light is not an integral characteristic of the formation of space, but only provides the expressiveness of the perception of other elements [19].

Detail – the presence of elements or groups of interior elements, their mutual location, as well as physical properties that complement the complex concept of interior design. Some authors also include texture and patterns as elements of the study of the interior. However, texture and pattern are characteristics of the tactility of the surface and the visual perception that describes the details or the whole space.

The most studied element that provides comfort to the interior of any room is color. The issues of color perception and optimal color solutions in different areas of the home are described in detail, both from the point of research concerning the design of the environment and the person and the impact of color on his mood and comfort. Thus, Gao X.-P. Kuller R., Ballal S. and others in the study of cross-cultural perception of color prove the extreme importance of room color in the process of human recovery [20, 21]. Also, color along with light has a crucial role in creating an atmosphere of intimacy and in the process of work or relaxation. Derivative elements of color are tone and gamma, the right combination of which enhances or weakens the visual perception of space or individual elements.

The priority of the characteristics of the living field is indirectly covered in a number of scientific papers concerning the study of various functional areas of residential apartments. The physical size of the room, in contrast to persistent stereotypes, can not only positively but also negatively affect the comfort of being indoors. The relationship between the size and function of the apartment is indisputable, although these figures may vary depending on the cultural characteristics of the residents, their marital status, the number of people or their level of well-being.

Detail is a sign of style in addition to the general proportions of elements in interior design. It is thanks to the details that it is possible to convey the client's mental priorities, to recreate his zone of psychological comfort in a residential apartment [22, 23]. J. Hijazi in his article substantiates the paramount importance of details in the rooms where a person's social ties with family members or other people, as well as areas of the apartment that are used for professional activities. Based on the analysis of research data, the hierarchy of living field characteristics (2.1) in accordance with the functional features of the rooms in a residential apartment is highlighted [24].

## 2. A model of comfortable interior for different human personality types.

Characterizing human personality types, scientists point to the interrelationships of different resilience that arise between personality types and the realization of their vital functions (life field). The hierarchical structure of the characteristics of the archetype [25] (1.1) and the characteristics of the living field (2.1), which are selected from the field of scientific research provided a more complete justification of architectural methods of comfort in the design of a residential apartment. Qualitative assessment of these connections is interpreted on the principle of possibility of application in interior design: where N – connection is not present, Y – connection is, W – connection is weak, M – connection is average, E – connection is significant, U – connection should be used when creating interior design (Figure 5).

The universality of this matrix is provided by the possibility of double analysis. The analysis of the elements of the living field (2) and the hierarchy of their characteristics to ensure the comfort of the apartment (the so-called "priority of rows"). As a result, architectural techniques have been identified, the use of which provides comfort to residents (3), (Table 1).

	The Archetype of Personality (1)	Average					Self-Centered					Role model					Reserved					Methods of providing comfort in the rooms and areas of the apartment (3)
The Name of The Life Field (2)	Characteristics of The Archetype (1.1)	Neuroticism	Extraversion	Honesty	Agreeableness	Openness	Extraversion	Neuroticism	Honesty	Agreeableness	Openness	Honesty	Agreeableness	Extraversion	Openness	Neuroticism	Honesty	Agreeableness	Extraversion	Neuroticism	Openness	
Intimacy	Size																					
	Color																					
	Detail			<b>M</b>					<b>Y</b>					<b>N</b>							<b>M</b>	
	Shape																					
Recreation	Color																					
	Size																					
	Shape			<b>U</b>										<b>W</b>							<b>E</b>	
	Detail																					
Social ties	Size																					
	Detail																					
	Color			<b>N</b>						<b>N</b>												
	Shape																					
Values	Detail																					
	Size																					
	Shape			<b>Y</b>						<b>U</b>											<b>W</b>	
	Color																					
Preferences	Shape																					
	Color																					
	Size			<b>E</b>						<b>E</b>					<b>Y</b>						<b>U</b>	
	Detail																					
Activity	Shape																					
	Size																					
	Color			<b>W</b>						<b>W</b>					<b>U</b>						<b>N</b>	
	Detail																					
Architectural features of creating a comfortable design of a residential apartment in accordance with the archetype of the resident (4)																						

Fig. 5. The matrix of comfort of a residential apartment depending on the functional zoning and personality type of residents (source: Author)

Table 1 – Architectural methods of creating comfort in the functional areas of a residential apartment (source: Author)

Number	The name of the life field (2)	Room where this aspect of the living field is realized	Architectural techniques to ensure comfort in the interior of a residential apartment
3.1	Intimacy	Bedroom, bathrooms (partly)	A priority importance in ensuring the intimacy of living spaces has the size and proportions of the elements in it. The choice of the size of the elements and the overall color scheme of these rooms provide a feeling of comfort.
3.2	Recreation	Living room, bedroom, dining room, bathroom	To ensure comfort in the recreation areas, the designer should pay special attention to the choice of colors; depending on the size of the room it needs to be visually balanced with the needs of the resident; details and shape of elements are of secondary importance.

3.3	Social ties	Kitchen, living room, entrance area	The area of social ties belongs to the category of representative zones, where the designer's attention should be paid to the size of the elements and details. It is the choice of details, their accent or nuanced meaning provides a sense of comfort in these areas.
3.4	Values	Entrance area, dressing room, living room (partly), bedroom (partly)	In rooms where the category of "values" is implemented, the details and visual size of the room are a priority. Details such as paintings, family photos or a place for souvenirs are important in these areas. The comfortable design of these zones is provided by placement of small elements of the organization of space around these elements.
3.5	Preferences	Dining room, living room, hall	The implementation of the "preference" function is concentrated in all rooms of the apartment. Shape and color are a priority to ensure the realization of comfort in these areas. Bright colors and unusual shapes of elements can be used in residential areas where this aspect of the living field is implemented. Given the priority functions of the room, such as the kitchen, the category of "preference" has a fragmentary implementation, respectively, the elements can be transformed or modular, which will ensure the variability of their use in the rooms.
3.6	Activity	Dining room (partly), living room, loggia, work area (in any living room)	The peculiarity of the implementation of this aspect of the living field (2) in the apartments is the concentration of this function in the separate zones of the bedroom, dining room, etc. The change in the functional priorities of human activities during the quarantine period indicates the need for actual or visual increase in these work areas. The characteristics of size and shape are the primary criteria when working with the interior design of the office area, meditation areas or solitude.

Highlighted architectural techniques allow the designer at the stage of pre-design analysis and zoning of the space, primarily to operate with those architectural characteristics of the room, the implementation of which has the greatest weight on the feeling of comfort.

At the next stage of the study an assessment of the socio-psychological characteristics of the potential resident of the apartment (1.1) and the functional use of space by him (2) (assessment with "priority of columns") is conducted.

This variant of the assessment allowed to highlight the architectural features of creating a comfortable design of a residential apartment in accordance with the type of personality of the occupant (4) (Table 2).

The obtained evaluation results are an example of the so-called cliché "apartment of a person of variable personality type" or "apartment of a person of egocentric type of personality") and others. Undoubtedly, these results cannot cover all many aspects of comfortable design for an individual, because in addition to socio-psychological characteristics, the formation of mental characteristics of comfort is also influenced by social characteristics (employment, marital status, age, religion, traditions, etc.).

Table 2 – Architectural features of creating a comfortable apartment design in accordance with the archetype of the resident (source: Author)

Number	The name of the archetype of the apartment owner	Recommendations for ensuring comfort in the interior
4.1	"Changeable"	The restoration of the function of recovery and implementation of lifestyle is the most important for this type of personality. Particular attention should be paid to the design of the living room, kitchen and bathroom. The customer's preference for the color and shape of the interior elements should be emphasized. The colors in the design of the rooms should not be bright. You need to maximize the customer's preferences in style decisions. Details in the interiors of the owners' apartments who have a changeable archetype of personality are of secondary importance.
4.2	"Egocentric"	Developing the interior design for this type of personality of the inhabitants, the owner's wishes should be taken into account in relation to all the characteristics of the living field: details, color, size and shape of the room and its elements (2.1). The priority is a dim range of warm colors with contrasting accents in the details. The most priority areas of the apartments of the owners of the egocentric type of personality are the entrance area, halls of any type, as well as the living room and dining room. The design of apartments for people with this type of personality should provide additional storage space, built-in closets and wardrobes.
4.3	"Leader"	For apartments of people with this type of personality, the comfort of the interior is provided by the size, shape and details of the rooms. The choice of color is not a priority, which allows you to make interesting decisions and combinations in the interior of the apartment. An important place in the apartments of residents with the type "Leader" is played by the office area, recreation area in the living room, as well as a representative area of the hall or entrance area. Clients are ready to make any non-standard and interesting decisions in planning and design of space.
4.4	"Closed"	Every piece of space should be studied in detail in the interior design of an apartment for people with this type of personality. Priority is given to all rooms where you can organize recreation, hobby, family entertainment and more. The designer should pay special attention to the color, shape and size of the space. Details are of secondary importance, so you should use such interior details that will be in the same style with the overall concept of the room.

**Research results.** Having studied the relationships that exist between the socio-psychological characteristics of a person and their implementation in the interior, a number of techniques and recommendations have been identified, the implementation of which should increase the level of comfort of residential apartments. In the process of practical activity of Antonov Design Studio, Ivano-Frankivsk, on the example of several real interior design projects, an experiment was conducted using techniques and features of comfortable design according to the archetype of the resident (Figure 6-9).

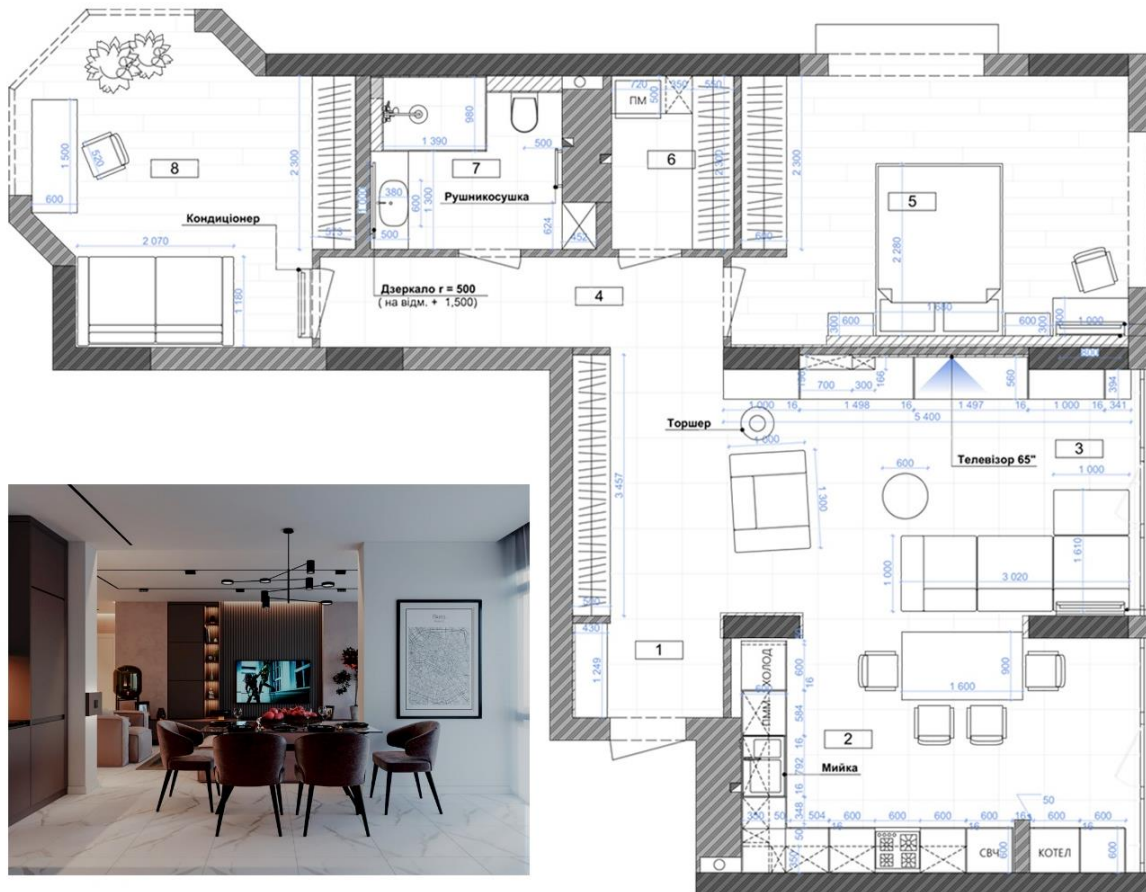


Fig. 6. Project 1. Design of a residential apartment using the analysis of socio-psychological comfort of the resident, Residential Complex Hydropark, Ivano-Frankivsk, 2021, designer Antonov Design

Project 1 defines that the client has a personality type "Leader", respectively, using the matrix of socio-psychological comfort in interior design, the main emphasis was on clear zoning, creating multifunctional spaces in each living area, the use of contract elements and multi-textured surfaces. Warm colors and hidden light provide comfort in the living room and bedroom. At the same time in the kitchen the effect of flowing to the "cold" color scheme is used.



Fig. 7. Project 2. Design of a residential apartment using the analysis of socio-psychological comfort of the resident, Residential Complex Hydropark, Ivano-Frankivsk, 2021, designer Antonov Design

In the process of developing a project of a residential apartment 2, it was determined that the owner of the apartment has a "closed" personality type. In accordance with the matrix of socio-psychological comfort and methods of providing comfort for residents with this type of character, a design project was created, which preserves the planning structure of individual rooms. According to the recommendation for a comfortable interior (Table 2), the designers focused on the color scheme of the entire apartment, which is selected on the basis of brown and white, as well as vertical articulation of elements that allows to visually increase the height of closed rooms. Minimalist furniture design provides focus on individual accent elements (chairs, lamps). Details in this project are of secondary importance, therefore, the primary aspect of creating the comfort of this interior was to create the functionality of all elements.



Fig. 8. Project 3. Design of a residential apartment using the analysis of socio-psychological comfort of the resident, Residential Complex Hydropark Christmassy, Ivano-Frankivsk, 2021, designer Antonov Design

In project 3, the customer had a clear "egocentric" personality type, as evidenced by the results of the survey. Designers from Antonov design, in accordance with the matrix of socio-psychological comfort, focused on the formation of zones that provide a living field of "values" (Figure 5). With the small size of the apartment, the designers managed to place 2 dressing rooms and several built-in closets for storing things. The field of "hobbies" is realized by creating an open kitchen-studio where the whole family can spend free time and communicate.



Fig. 9. Project 4. Design of a residential apartment using the analysis of socio-psychological comfort of the resident, Yarkovytsya-4, Kalush, 2021, designer Antonov Design

Project 4 is a smart apartment with an area of 48 sq. m. The homeowner has a "closed" personality type. In the design decision designers created a multifunctional kitchen-living area, made color accents in the furniture and cladding of individual parts of the rooms. All design decisions of the rooms are made in a single style. Visual enlargement of the space is provided by light colors of the walls, "shadow seams" and large tactile panels are used in the surface texture.

At the stage of communication with apartment owners, designer Bohdan Antonov asked clients to pass a short survey to determine the type of personality. The questionnaire of Gerlach, M. and others, which they used in their own research, was used. After studying the results of the survey and determining the client's archetype, the designers used a matrix of socio-psychological comfort of a residential apartment while working on apartment design solutions (Figure 5). After developing the design solution and completing the formal creative part of the work, a second survey of clients who participated in the experiment was conducted (Table 3).

Table 3 – Questionnaire to ensure comfort in the design solutions of this apartment

№	Question	Answer		
		"Yes"	"I cannot answer"	"No"
1	Is this design solution comfortable for you?			
2	Does this design solution reflect the full range of your life functions?			
3	Is the size of all the elements in this design solution comfortable for you?			
4	Is the color of all the elements in this design solution comfortable for you?			
5	Are all the details of this design solution comfortable for you?			

The evaluation of the answers was as follows: "Yes" – 1 points, "I cannot answer" – 0.5 points, "No" – 0 points.

The method of questionnaires determined the generalized level of comfort of the design solution of residential apartments where the matrix of socio-psychological comfort was used before and without it. For interior design projects where the method of determining the socio-psychological personality type was used, the average level of comfort was 98.5%, and in design decisions developed according to the classical scheme, the level of overall comfort according to the survey is 94.5%.

**Conclusions.** Summing up the study of the influence of socio-psychological aspects of personality on the peculiarities of the formation of a comfortable living environment, we can conclude that there are relationships between character features and signs of comfort for everyone. Based on interdisciplinary research in the areas of socio-design, psycho-design and architecture of the interior environment, macro-elements of the interior of the living space have been identified, which provide the comfort of living space. At the same time, studies of the interior of a residential apartment from the point of the characteristics of the psychology of the resident, indicate the need to use the phenomenon of "life field", a category that more fully conveys the functional content of space and behavior. As a result of the analysis of the components of the living field, the most common architectural features of comfort were identified, namely: size, color, shape and detail.

The author's concept of the interaction of socio-psychological features of character and the corresponding architectural and spatial features of comfort, depending on the type of personality, we indicate a set of recommendations and techniques that can be used in pre-project analysis and implementation of interior design. Thus, after assessing the priorities of the field of life in accordance with the archetype of personality, the architectural features of comfortable design for 4 archetypes of residents were formed: changeable, egocentric, leader, closed. Another field of the analysis focused on finding ways to ensure comfort in the rooms and areas of the apartment. Such techniques are the priority of the size of the elements and the overall color scheme in the rooms where the "intimacy" is realized as a component of the living field. For the living room, dining room and bathroom, where the component of the living field "preferences" is realized, details are of secondary importance, but the designer should pay attention to the shape of the elements and their color.

These techniques are universal, and the hierarchy of characteristics of the living field is effective at all levels of implementation of housing design. The practical effectiveness of these techniques is confirmed by checking the results obtained during the practical activities of the designer. Using the matrix of socio-psychological comfort and conducting a preliminary analysis of the personality type of residents, the designers used the recommendations of this study and formed interior solutions according to them. After the formal part of the design, a survey of apartment owners was conducted, which shows that in all 4 studied cases the level of comfort in the interior design of a residential apartment for each resident is much higher than in design solutions where this algorithm was not used.

**Acknowledgements.** Sincere thanks to Bohdan Antonov, the founder of ‘Antonov Design Studio’, who agreed to conduct an experiment – to test the results of this study in the process of developing interior design and working with clients.

### References

- [1] A.M. Salama, "Coronavirus questions that will not go away: interrogating urban and socio-spatial implications of COVID-19 measures", *Emerald Open Res.*, 2 (14), 2020. <https://doi.org/10.35241/emeraldopenres.13561.1>.
- [2] T. Peters, A. Halleran, "How our homes impact our health: using a COVID-19 informed approach to examine urban apartment housing", *Archnet-IJAR*, 15 (1), pp. 10-27, 2020. <https://doi.org/10.1108/ARCH-08-2020-0159>.
- [3] D. Nielsen, "17 Architects and Designers on How the Pandemic Will Change Our Homes Forever", *Dwell*, 2020. [Online]. Available: <https://www.dwell.com/article/architects-say-coronavirus-covid-19-pandemic-will-change-home-design-ee29c873>.
- [4] S. Makhno, "Life after coronavirus: how will the pandemic affect our homes?", *Dezeen*, 2020. [Online]. Available: <https://www.dezeen.com/2020/03/25/life-after-coronavirus-impact-homes-design-architecture/>
- [5] A. Danaeina, "The sense of entrance to a place in Kashan historical houses", *Journal of Architecture and Urbanism*, 45(1), pp. 38-49, 2021. <https://doi.org/10.3846/jau.2021.13209>.
- [6] V. Durmanov, "The influence of state's policy on the Development of the geometry of premises on example of the evolution of Russia housing", *Space & Form*, vol. 46, pp. 47-68, 2021. <https://doi.org/10.21005/pif.2021.46.B-03>.
- [7] O. Remizova, "Architectural memory and forms of its existence", *Journal of Architecture and Urbanism*, 44(2), pp. 97-108, 2020. <https://doi.org/10.3846/jau.2020.13053>.
- [8] D. Vakalis, M. Touchie, E. Tzekova, H.L. MacLean, J.A. Siegel, "Indoor environmental quality perceptions of social housing residents", *Building and Environment*, vol. 150, pp. 135-143, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.062>.
- [9] L.T. Graham, S.D. Gosling, C.K. Travis, "The psychology of home environments: a call for research on residential space", *Perspect Psychol Sci.*, vol. 10(3), pp. 346-56, 2015. <https://doi.org/10.1177/1745691615576761>.
- [10] S. M. Bianchi, M.A. Milkie, L.C. Sayer, J.P. Robinson, "Is anyone doing the housework? Trends in the gender division of household labor", *Social Forces*, 79, pp. 191-228, 2000.
- [11] R. Gifford, *Environmental psychology: Principles and practice* (4th ed.), Optimal Books, Colville, WA, 2007.
- [12] D. Goux, E. Maurin, "The effect of overcrowded housing on children's performance at school", *Journal of Public Economics*, 89, pp. 797–819, 2005.
- [13] I.P. Gnes, *Apartment housing: evolutionary trends*, Lviv, pp. 127-129, 2013.
- [14] S. Kobzan, S. Nesterenko, "About new aspects of the development of the market of mini apartments in Ukraine", *E3S Web Conf.* vol. 166, 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016609002>.
- [15] N. Ghosh, "Modern designs: history and memory in Le Corbusier's Chandigarh", *Journal of Architecture and Urbanism*, 40(3) pp. 220–228, 2016. <https://doi.org/10.3846/20297955.2016.1210048>.
- [16] C. Castell, D. Oberfeld, H. Hecht, "The Effect of Furnishing on Perceived Spatial Dimensions and Spaciousness of Interior Space", *PLOS ONE*, 9(11): e113267, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113267>.
- [17] S. Bang, "Urbanism between infrastructure and the interior", *The Journal of Architecture*, vol. 26, issue 7, pp. 1000-1030, 2021. <https://doi.org/10.1080/13602365.2021.1978522>.
- [18] M.F. Hussein, A.A. Al-Ayash, H.F. Hussein, "The influence of interior design elements on children's' learning, happiness, comfort and growth (petra nursery as A case study)", *International Journal of Mechanical Engineering*, 7(1), pp. 68-75, 2022.
- [19] S. Lee, H.H. Alzoubi, S. Kim, "The Effect of Interior Design Elements and Lighting

- Layouts on Prospective Occupants' Perceptions of Amenity and Efficiency in Living Rooms", *Sustainability*, 9 (1119), pp. 4-9, 2017. <https://doi.org/10.3390/su9071119>.
- [20] X.-P. Gao, J.X. Xin, T. Sato, A. Hansuebsai, M. Scalzo, K. Kajiwara, S.-S. Guan, J. Valldeperas, J.M. Lis, M. Billger, "Analysis of cross-cultural color Emotion", *Color Research and Application*, 32, pp. 223–229, 2007.
- [21] R. Kuller, S. Ballal, T. Laike, B. Mikellides, G. Tonello, "The impact of light and colour on psychological mood: A cross-cultural study of indoor work environments", *Ergonomics*, 49, pp. 1496-1507, 2006.
- [22] E. Amaturio, S. Costagliola, G. Ragone, "Furnishing and status attributes: A sociological study of the living room", *Environment and Behavior*, 19(2), pp. 228–249, 1987.
- [23] B. Riemann, "Ideal Architectural Housing Types for Different Housing Families", Nia Architects, 2020. [Online]. Available: <https://niaarch.com/ideal-architectural-housing-types-for-different-lifestyles/>
- [24] J. Hijazi, D. Attiah, "Saudi residences' adaptability: How employees worked from home during covid-19 lockdowns", *Civil Engineering and Architecture*, 9 (3), pp. 915-931, 2021. <https://doi.org/10.13189/CEA.2021.090334>.
- [25] J.-P. Freudenstein, C. Strauch, P. Mussel, M. Ziegler, "Four personality types may be neither robust nor exhaustive", *Nat. Hum. Behav.*, 3, pp. 1045–1046, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41562-019-0721-4>.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМФОРТУ ІНТЕР'ЄРУ БАГАТОКВАРТИРНИХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ ДЛЯ РІЗНИХ ТИПІВ ОСОБИСТОСТІ

Смадич І.П., кандидат архітектури,

info@Smadych.com, ORCID: 0000-0001-7964-57301

Інститут Архітектури, будівництва та енергетики

Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

**Анотація.** Під час періоду карантинних обмежень, а пізніше повномасштабного вторгнення росії на територію України загострили проблеми, що пов'язані зі зміною місця проживання, відповідно зміни рівня соціальних комунікацій, проблем комфорту та реалізації всіх життєвих функцій у житловому просторі квартир житлових будинків. Основною метою статті є вивчення зв'язку між архітектурними характеристиками комфорту в інтер'єрі житлової квартири та типами особистості мешканців. Предметом нашого дослідження є архітектурно-просторові характеристики комфорту житлової квартири. Аналіз наукових досліджень у галузі психодизайну та соціодизайну вказує на стратифікацію типів людської особистості на 4 типи, які реалізують всі свої життєві функції в "полі життя". Інша сфера досліджень зосереджена на знаходженні найбільш інтегрованих характеристик інтер'єру житлового простору. До таких характеристик належать розмір, форма, колір і деталі.

Основним методом дослідження є побудова двокомпонентної матриці, за допомогою якої можна визначити зв'язки між компонентами інтер'єру житла та рівнем комфорту для його мешканців. В результаті аналізу та оцінки концепції взаємодії соціопсихологічних особливостей характеру та відповідних архітектурно-просторових характеристик комфорту в залежності від типу особистості сформовані практичні рекомендації, які можна застосувати в процесі передпроектного аналізу та на етапі створення архітектурно-планувальних рішень квартир та створенні дизайну інтер'єру. Експериментально перевіривши отримані результати в процесі створення дизайну інтер'єрів кількох житлових квартир м. Івано-Франківська демонструє, що рівень комфорту житлових квартир де застосовувались алгоритми даного дослідження є значно вищим, ніж у архітектурно-планувальних рішеннях, де дана методика не використовувалась.

**Ключові слова:** дизайн інтер'єру, соціопсихологічний комфорт житла, характеристики житлового середовища, комфорт житла, параметри житлового комфорту.

Стаття надійшла до редакції 28.03.2024

**THE MULTI-STOREY BUILDINGS STEEL FRAMES PROGRESSIVE COLLAPSE MECHANISMS IN FIRE**<sup>1</sup>**Daurov M.K.**, PhD, Associate Professor,

mk19daurov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6338-4326

<sup>1</sup>**Bilyk A.S.**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor,

artem.bilyk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9219-920X

<sup>1</sup>**Nyzhnyy V.V.**, Senior Lecturer,

nuzhnyy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0400-3204

<sup>1</sup>*Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture*

31, Povitroflotsky Ave., Kyiv, 03037, Ukraine

<sup>2</sup>**Shostal V.S.**, design engineer,

Shostalvs@gmail.com, ORCID: 0009-0004-8098-1626

<sup>2</sup>*RPE «Vartist»*

**Abstract.** An overview of previous studies, dedicated to the vitality of the multi-story building with a steel frame was carried out. Currently, measures are available to increase the multi-story buildings' steel frame vitality in fire, which affects the potential progressive collapse mechanism. The quantitative vitality indicators have been determined earlier. The model used to study a multi-story building steel frame is described. The way of modeling the fire action on steel structures is presented. The criterion for the steel frame elements destruction is determined.

The measures of increasing vitality for the multi-story building steel frame model are presented. The sequence of multi-story buildings' steel frames different elements destruction for a various measures of increasing vitality is determined. The collapse duration of each of the considered progressive collapse mechanisms is analyzed.

It is established that the initial destruction in the unheated frame element leads to a less projected and more unfavorable progressive collapse mechanism in the event of an accident evacuation. It is determined that to avoid the initial destruction in the unheated frame element, you need to use an attachment of the outriggers to the columns joint with the admission of vertical displacements. It is established that in the case of beam destruction earlier than the column, the progressive collapse mechanism will be longer than in the column's initial destruction case. Earlier internal column destruction leads to a longer progressive collapse mechanism than earlier external column destruction. It is established that the progressive collapse mechanism of the type "beam - the internal column - the external column – progressive collapse" is the longest and the most predictable. The gradation of the progressive collapse mechanisms of steel frames in the role of a qualitative vitality indicator is determined. The gradation presented can be used for the research of frames with a variety of spans and floors.

**Keywords:** finite element method, steel structures, vitality, fire, progressive collapse, collapse mechanism.

**Introduction.** The main purpose of a building's load-bearing structure design is to prevent the destruction of each element it consists of. As the load-bearing structures develop as systems, new threats can potentially destroy the building. Designing a building in such a way that the action of load from their weight, load from people and equipment, snow and wind, etc., possible and corresponding requirements are present in the current regulatory documents. However, for many buildings, a fire, explosion, impact, etc. is an extraordinary influence, and the design of a building's structures to prevent any destruction is impossible or economically inappropriate. In this regard, scientific studies of the vitality structures as a system - the ability to resist local destruction and prevent its spread. Fire as a threat has been relevant at all times but is becoming more widespread today because of the war russia against Ukraine.

**Analysis of previous research.** Today, research on the vitality of multi-story buildings load-bearing steel structures can be divided into vitality in modeling the explosion, fire, and earthquake. Numerous research has been conducted to invent measures for enhancing structures vitality. As a basic measure, when the column is destroyed, there are outrigger systems [1-4] were investigated, which redistribute forces from the destroyed column to other elements. In British studies, the steel frame joints load-bearing capacity in a fire was analyzed [5]. In Japanese studies [6], combined outrigger systems and the columns load capacity ratio were studied. It was determined that a ratio of 0.25 is sufficient to ensure vitality or fire. The study of the ensuring vitality of multi-story building's steel frames by preventing any destruction by increasing the cross sections of the elements and increasing fire protection showed that such an approach requires an increase in the metal intensity of the frame by 40-60% [7]. The feasibility of using the hinged joints of the adjoining beams to the columns to achieve a more projected numerical destruction was found in [8].

To enhance the vitality of multi-story building's steel frames, a technique was developed [9], which includes the following measures:

- regulation of the load capacity ratio difference in the beams and columns of the frame;
- taking into account the frame element's cross-section shape which affects the temperature in the frame element in fire and local buckling when heated;
- the nodes of the adjacent elements of the outriggers.

Different measures can have a different effect on the frame's vitality. Quantitative and qualitative indicators are required to evaluate this impact. In [9], the quantitative indicator of the steel frame vitality in the fire is "vitality time": the period from the destruction of one of the elements to the final collapse of the frame (vitality loss). Defining quality vitality is an open issue today.

This work is offered as a qualitative vitality "type of collapse mechanism" – a sequence of destruction of different frame elements. In [10], the impact of fire location on the potential collapse mechanism was previously investigated and the most unfavorable was determined. In [11-12] the next collapse mechanisms were investigated: vertically or lateral.

**Research tasks.** The following tasks are completed in this research:

- to analyze the existing measures of increasing the vitality of multi-story buildings' steel frames in fire, which affect the potential mechanism of their collapse;
- to determine the destruction sequence of different elements of multi-story buildings' steel frames for various measures of increasing the vitality;
- analyze the duration of the destruction of each of the mechanisms considered;
- to determine the gradation of destruction mechanism types of steel frames in the role of qualitative vitality.

**Materials and research methods.** Modeling the collapse of the multi-story building steel frame was made in the fire under different initial conditions. As the initial conditions were considered the measures of the frame vitality enhancement:

- the use of outrigger systems for redistribution of efforts due to the column destruction;
- different joints of attachment of outrigger systems;
- different differences in load capacity ratio in the elements of beams and columns;
- different shapes of elements cross sections of beams and columns.

The frame is modeled as rod finite elements. There are 3 spans, 3 floors. The beams span is 7.2m, floor height – 3.6m. For comparing the work of beams and columns of the frame, one cross-section of the beam was taken in different spans on different floors, and one cross-section of different floor columns. The rigid bases of columns and hinged beams to the column connections were adopted. On beams during the fire, there is a uniformly distributed load of 6 t/m, which simulates the effect of dead and live load in a residential or public multi-story building. The external columns are horizontally distributed load, which models the wind load, which adds a significant proportion to the load capacity ratio of columns in multi-story buildings. The steel of the frame elements is S255.

The action of the fire is modeled by temperature loads, which were determined by DSTU B EN 1993-1-2: 2010 [13]. The fire location is taken in the external span on the 1st floor (Fig. 1) as the most

unacceptable in terms of the distribution of effort and potential collapse [10]. There is no fire protection for steel structures. The frame was calculated by [14-15].

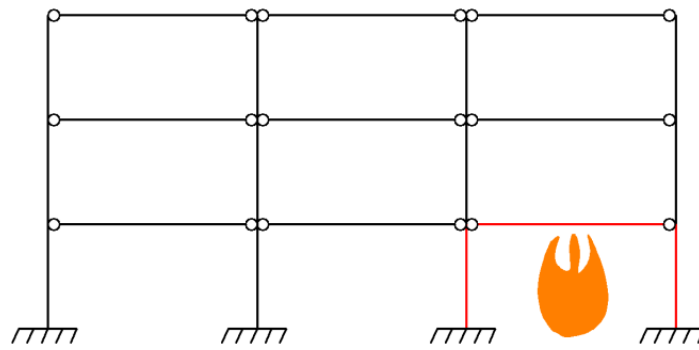


Fig. 1. The fire location in the frame

The frame elements are designed from a solid welded I-beam cross-section. It was accepted the plastic hinge occurs earlier than the local buckling. This allows modeling the frame collapse with rod finite elements.

The destruction criteria of a plastic hinge in the element. The element destruction was modeled with element removal from the calculation scheme with the reactions with the opposite sign. The dynamic factor value is accepted as 1 because the fire is not the factor that leads to instant destruction.

**Research results.** The first calculation was made for the frame, in which the load capacity ratio in the most loaded column and the most loaded beam was taken 0.5. Outrigger systems were used as a measure to increase vitality (Fig. 2).

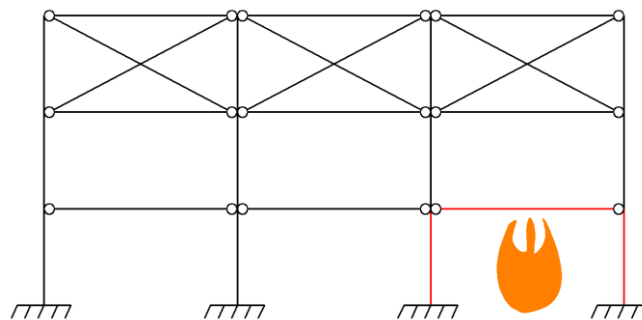


Fig. 2. Scheme of steel frame with outrigger systems

The first ruined element is the internal unripe column on the ground floor. The destruction time is 18 minutes. The deformed frame scheme is shown in Fig. 3, a.

In the next stage, as of 18.5 minutes the destruction of the middle heated column and the external unheated column (Fig. 3, b). The final destruction occurs because of the fall above-located floors below (Fig. 3, c).

It can be concluded that the mechanism of destruction of the type of "unheated middle column – heated internal column – final collapse" lasts 1 min (2 stages of calculation), is fast and dangerous in terms of people's ability to evacuate from the building in the event of an accident.

The second calculation was made for a similar frame, but with the attachment of the outrigger nodes, which allow vertical movement (Fig. 4). It is accepted that the elements of the outriggers are included in the calculation scheme only after the column is damaged.

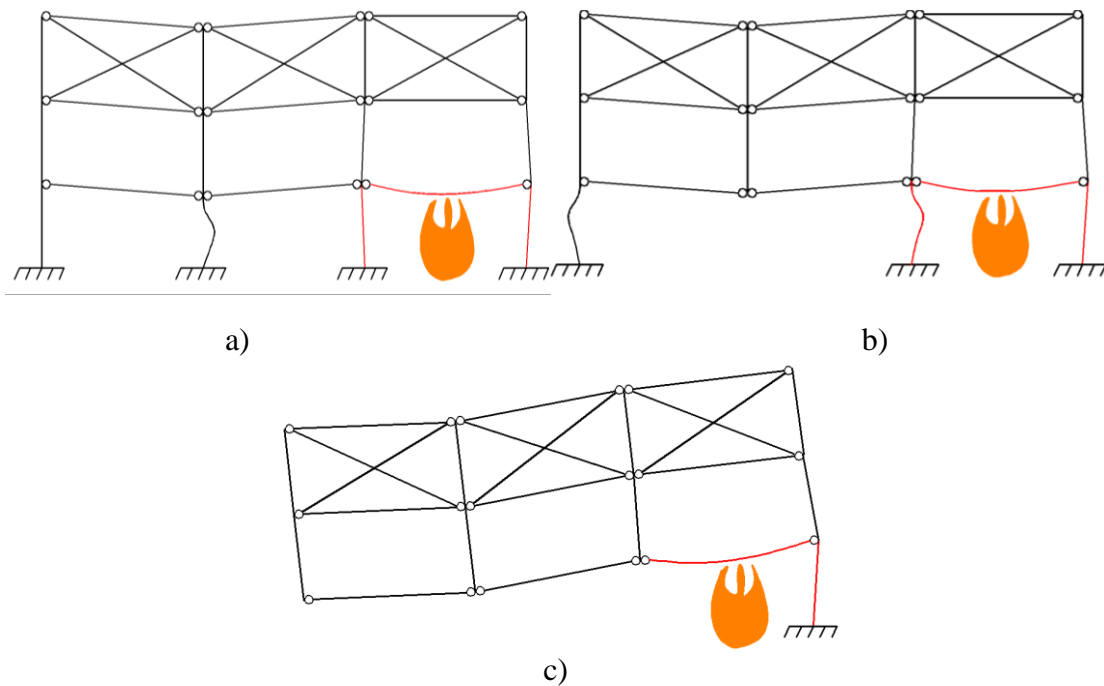


Fig. 3. The sequence of frame collapse for the first calculation:  
 a – destruction of the internal unheated column; b – destruction of the heated internal and external unheated column; c – final collapse

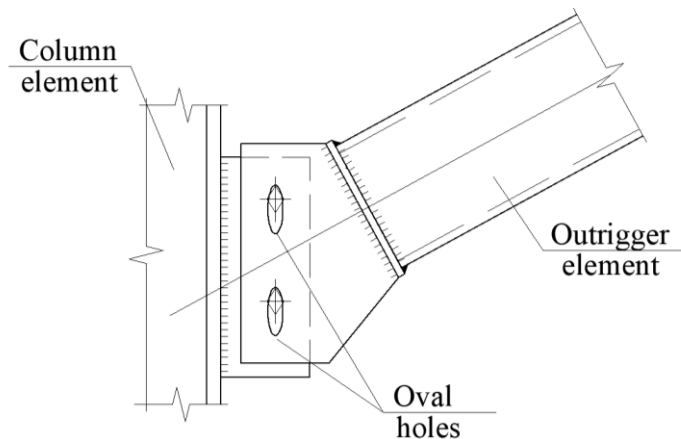


Fig. 4. Typical outrigger element to column connection

As of 21 minutes, the first collapsed element was the heated internal column on the 1st floor (Fig. 5, a). After removing the collapsed column in the calculation scheme in the next stage (21.5 minutes), the unheated internal column (Fig. 5, b) is immediately collapsed. As of 22 minutes, the final collapse of the frame was due to the destruction of the external columns (Fig. 5, c).

In this case, the collapse mechanism was like a sequence "heated internal column – the external column – the final collapse". The first destruction occurs in a heated element, which is more predicted in the scientific study of this phenomenon. Destruction occurs 3 minutes later than in the first calculation. Such a mechanism as the previous one is also fast and dangerous.

The third calculation was made for the frame in which the joints of the attachment of the outriggers according to Fig. 4 and the load capacity ratio in the most loaded column is 20% higher than in the most loaded beam. The collapse mechanism occurred with the following sequence:

- as of 22 minutes the heated beam collapsed (Fig. 6, a);
- as of 27 minutes the internal heated column collapsed (Fig. 6, b);
- as of 27.5 minutes the destruction of the externally heated column (Fig. 6, c);
- as of 28 minutes the final collapse of the frame (Fig. 6, d).

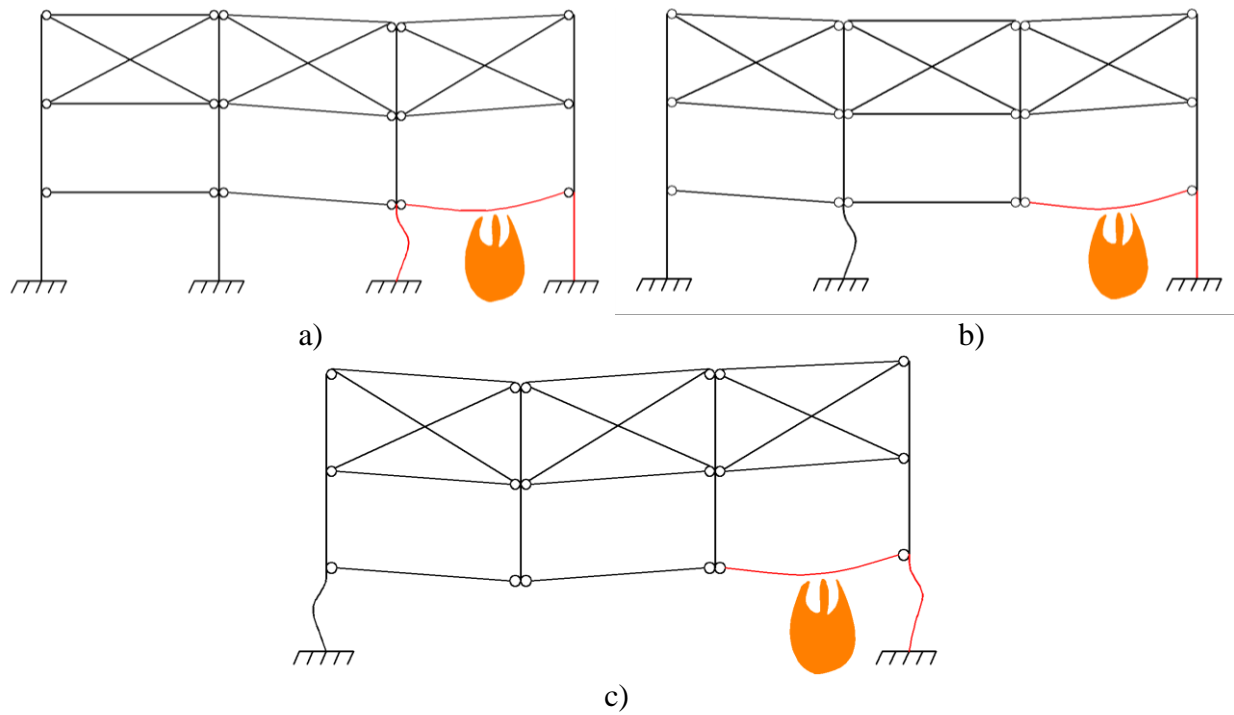


Fig. 5. The sequence of frame collapse for the second calculation:  
 a – destruction of the heated internal column; b – destruction of the unheated internal column;  
 c – final collapse

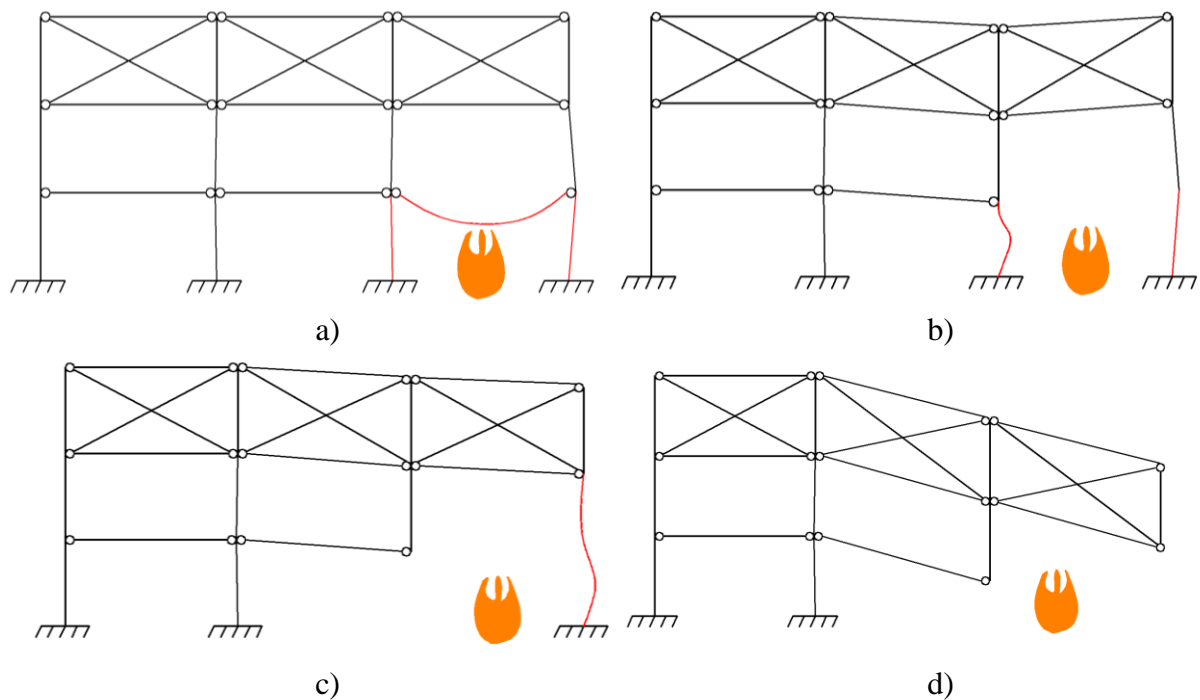


Fig. 6. The sequence of frame collapse after the third calculation:  
 a – destruction of the beam; b – destruction of the heated internal column; c – destruction of the heated external column; d – is the final collapse

The comparison of the third calculation with the two preliminary calculations for the frame collapse in the fire was established:

– the collapse mechanism of the type "beam-internal column-external column-final collapse" begins later in time (22 minutes compared to 18 minutes for "unheated internal column-heated internal column-final collapse" and 21 minutes "heated internal column-external column-final collapse");

– collapse mechanism of the type "beam-internal column-external column-final collapse" is longer (6 min compared to 1 min for "unheated internal column-heated internal column-final collapse" and 1 min "heated internal column-external column-final collapse").

The fourth calculation was made for a similar frame with a span of 9.6m (Fig. 7). Measures to enhance vitality are similar to the preliminary calculation.

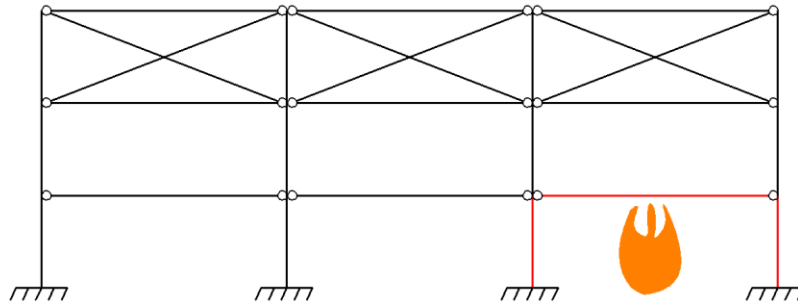


Fig. 7. A frame with a span of 9.6m

The collapse mechanism occurred with the following sequence:

- as of 25.5 minutes the heated beam collapsed (Fig. 8, a);
- as of 26 minutes was the destruction of the externally heated column (Fig. 8, b);
- as of 26.5 minutes the destruction of the internal heated column (Fig. 8, c);
- as of 27 minutes the final collapse of the frame (Fig. 8, d).

As you can see from the values of the time, the collapse mechanism is the type of "beam – the externally heated column – the internal heated column – the final collapse" less than the duration (1.5 min) by the mechanism type of "beam – the internal column – the external column", but longer than the mechanisms where the first column is collapsed. The results of all calculations are listed in Table. 1.

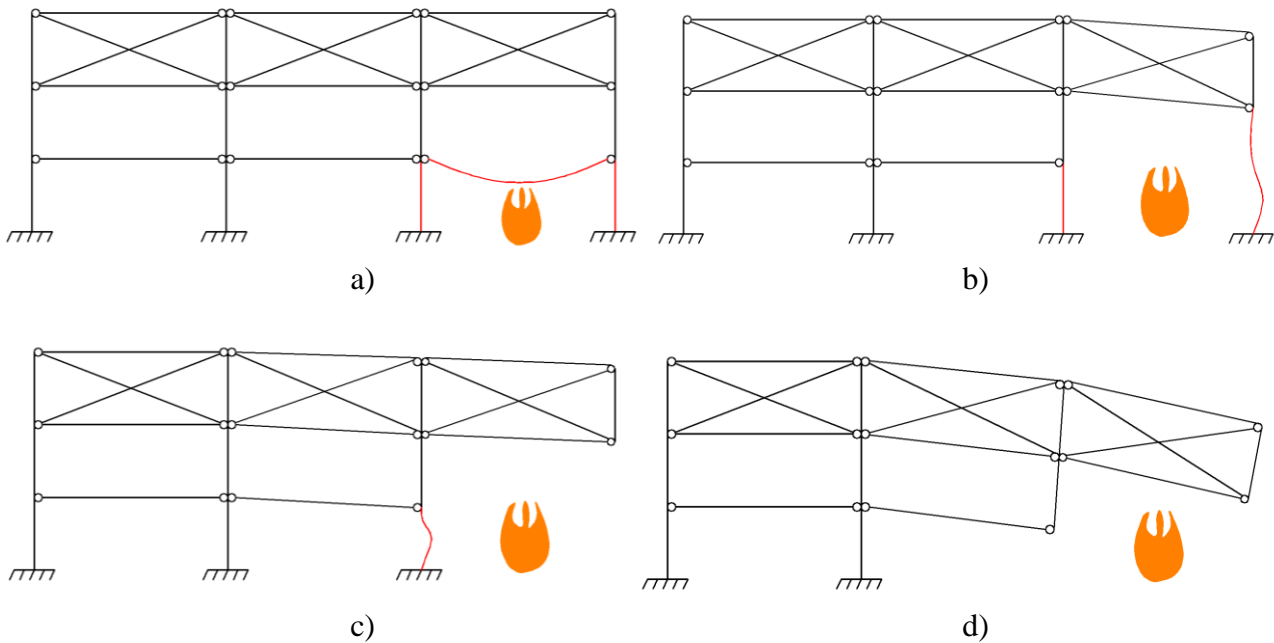


Fig. 8. The sequence of frame collapse for the fourth calculation:

- a – destruction of the beam; b – destruction of the heated external column; c – destruction of the heated internal column; d – the final collapse

Table 1 – Calculations results

Collapse mechanism type	The time of the onset of collapse, min	Duration of destruction, min
«unheated internal column –heated internal column – final collapse»	18	1
«heated internal column –external column – final collapse»	21	1
«beam – internal column –external column – final column»	22	6
«beam – external heated column – internal heated column – final column»	25.5	1.5

**Conclusions.** The above calculations revealed various collapse mechanisms of multi-story buildings' steel frames. The collapse mechanism will be longer and predictable if:

- the first will collapse the heated element of the frame;
- the first element to be collapsed should be a beam, not a column that prevents loading of other columns;
- the internal column should be collapsed earlier than the external, which prevents the console from "hanging" above the floors.

Based on the above gradation, it is possible to qualitatively evaluate the vitality of steel frames as a result of a fire and other factors. The stated provisions can be taken as a basis for the study of the vitality of steel frames with different numbers of spans and floors.

### References

- [1] A.S. Bilyk, A.I. Kovalenko, "Porivnyannya metodiv rozrakhunku metalevikh karkasiv visotnikh budivel' na odinichnu zhivuchist'", *Zbirnik naukovikh prac' Ukraïns'kogo institutu stalevikh konstrukcij imeni V. M. Shimanovs'kogo*, no. 16, pp. 30-39, 2015.
- [2] A.S. Bilyk, A.I. Kovalenko, "Dinamichni zusillya v kolonakh stalevikh karkasiv bagatopoverkhovikh budivel' pri rozrakhunku na odinichnu zhivuchist'", *Resursoekonomni materialy, konstrukcii, budivli ta sporudi*, no. 32, pp. 304-309, 2016.
- [3] A.I. Kovalenko, "Osoblivosti proektuvannya bagatopoverkhovikh budivel' z odinichnoyu zhivuchistyu", *Visnik Odes'koï derzhavnoï akademii budivnictva ta arkhitekturi*, no. 63, pp. 62-66, 2016.
- [4] A.S. Bilyk, A.I. Kovalenko, "Suchasni metodi modelyuvannya progresuyuchogo ruzhuvannya budivel' i sporud", *Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya : Sozдание vysokotekhnologicheskikh ehkocompleksov v Ukraine na osnove koncepcii sbalansirovannogo (ustojchivogo) razvitiya*, no. 87, pp. 35-41, 2016.
- [5] R. Sun, I. Burgess, Zh. Huang, G.Dong, "Progressive failure modelling and ductility demand of steel beam-to-column connections in fire", *Engineering Structures*, no. 89, pp. 66-78, 2015.
- [6] A. Wada, K. Ohi, H. Suzuki, Y. Sakumoto, M. Fushimi, H. Kamura, Y. Murakami, M. Sasaki, K. Fujiwara, *Study of Structural Redundancy of High-Rise Steel Building Due to the Effect of Heat and Loss of Vertical Structural Members*, 2004.
- [7] M.K. Daurov, A.S. Bilyk, "Providing of the vitality of steel frames of high-rise buildings under action of fire", *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*, no. 102, pp. 62-68, 2019.
- [8] M.K. Daurov, A.S. Bilyk, "Multi-storey steel frames in fire stress state comparison of under different initial conditions and their influence on vitality", *Modern construction and architecture*, no. 1, pp. 27-43, 2022.
- [9] M.K. Daurov, A.S. Bilyk, "The multi-story buildings steel frames vitality in the fire increasing", *Modern construction and architecture*, no. 4, pp. 14-22, 2023.
- [10] M.K. Daurov, A.S. Bilyk, "Investigation of changes in steel frames stress state in fire and influence on its vitality", *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles*, no. 108, pp. 325-336, 2022.

- [11] J. Jiang, G.Q.Li, A.S. Usmani, "Progressive collapse mechanisms of steel frames exposed to fire", *Advances in Structural Engineering*, № 17(3), pp. 381-398, 2014.
- [12] B.H. Jiang, G.Q. Li, A.S. Usmani, "Progressive collapse mechanisms investigation of planar steel moment frames under localized fire", *Journal of Constructional Steel Research*, № 115, pp. 160-168, 2015.
- [13] DSTU-N B EN 1993-1-2:2010. Yevrokod 3. Proektuvannia stalevykh konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2010.
- [14] DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2006.
- [15] DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2014.

## МЕХАНІЗМИ РУЙНУВАННЯ СТАЛЕВИХ КАРКАСІВ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ ПРИ ПОЖЕЖІ

<sup>1</sup>Дауров М.К., док. філ., доцент,  
mk19daurov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6338-4326

<sup>1</sup>Білик А.С., к.т.н., доцент,  
artem.bilyk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9219-920X

<sup>1</sup>Нужний В.В., ст.викладач,  
nuzhnyy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0400-3204

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури  
пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03037, Україна

<sup>2</sup>Шосталь В.С., інженер-конструктор,  
Shostalvs@gmail.com, ORCID: 0009-0004-8098-1626

<sup>2</sup>НДПП «Вармість»

**Анотація.** Проведено огляд попередніх досліджень присвячених питанню живучості багатоповерхових будівель зі сталевим каркасом. Проаналізовано наявні на сьогодні заходи посилення живучості сталевих каркасів багатоповерхових будівель при пожежі, які впливають на потенційний механізм їх руйнування. Визначені кількісні показники живучості, досліджені раніше. Описано використану в дослідженні модель сталевих каркасів багатоповерхової будівлі. Представлено спосіб моделювання дії пожежі на сталеві конструкції. Визначено критерій руйнування елементів сталевих каркасів.

Представлено використані заходи посилення живучості для моделі сталевих каркасів багатоповерхової будівлі. Визначено послідовність руйнування різних елементів сталевих каркасів багатоповерхових будівель за різних заходів посилення живучості. Проаналізовано тривалість руйнування кожного з розглянутих механізмів.

Встановлено, що початкове руйнування в ненагрітому елементі призводить до менш прогнозованого і більш несприятливого механізму руйнування з точки зору евакуації в разі аварії. Визначено, що для уникнення початкового руйнування в ненагрітому елементі потрібно використовувати вузол кріплення аутригерів до колон з допущенням вертикальних переміщень. Встановлено, що у випадку руйнування балки раніше за колону, механізм буде тривалішим, ніж у випадку початкового руйнування колони. Більш раннє руйнування середньої колони призводить до тривалішого механізму, ніж більш раннє руйнування крайньої колони. Встановлено, що механізм руйнування типу «балка-середня колона-крайня колона-остаточне руйнування» найбільш тривалий та найбільш передбачуваний. Визначено градацію типів механізму руйнування сталевих каркасів в ролі якісного показника живучості. Представлена градація може бути використана для досліджень каркасів різної прольотності та поверховості.

**Ключові слова:** метод скінченних елементів, сталеві конструкції, живучість, пожежа, прогресуюче руйнування, механізм руйнування.

Стаття надійшла до редакції 14.05.2024

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТРУКТУРНОЇ ПЛИТИ ПОКРИТТЯ

<sup>1</sup>Срібняк Н.М., к.т.н., доцент,  
nataliya.sribnyak.17@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3205-433X

<sup>1</sup>Циганенко Л.А., к.т.н., доцент,  
tsyganenkola@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6628-3635

<sup>1</sup>Галушка С.А. старший викладач,  
galushka\_sa@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2789-8570

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

<sup>1</sup>Сумський національний аграрний університет  
вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40000, Україна

**Анотація.** На перерозподіл і величину осевих зусиль в стержнях структурних плит впливає ряд факторів: спосіб розташування та кількість опор, наявність чи відсутність попереднього натягу в конструкції, форма базового кристалу плити, що є формоутворюючим, висота (товщина) плити, що може варіюватися в певних допустимих межах. Зміна однієї з цих ознак при незмінній решті показників суттєво змінює напружено-деформований стан конструкції.

В статті наведено опис скінченоелементних моделей структурної плити покриття з розміром в плані 12,0×24,0 м. Прийнято чотири моделі плити, що відрізняються лише одним параметром – товщиною конструкції. Прийнято такі значення висоти конструкції: 1,5 м (модель № 1); 1,3 м (модель № 2); 1,1 м (модель № 3); 0,9 м (модель № 4). Виконано статичні та конструктивні розрахунки всіх моделей, що прийнято. Підібрано нові профілі конструктивних груп стержнів таким чином, щоб вони відповідали умовам перевірки за першою та другою групами граничних станів та відсоток використання перерізу стержня був якомога вищим. Проаналізовано максимальні прогини моделей після статичного розрахунку. Найменша вага як критерій оптимальності є для будівельних конструкцій, зокрема металевих, найбільш поширеним критерієм, оскільки цей критерій достатньо легко формалізувати.

Обчислено вагу кожної моделі плити й встановлено, що оптимальним конструктивним рішенням є модель № 1 з висотою 1,5 м, оскільки лише для цієї моделі деформативність знаходиться в допустимих межах. Модель, що характеризується найменшою вагою, є модель № 3, але максимальний вертикальний прогин такої конструкції є більшим за гранично допустимий.

У висновках встановлено, що аналіз переміщень вузлів моделей плити виявив, що лише максимальний прогин плити за моделлю № 1, не перевищує гранично допустимий прогин в 4,8 см. Максимальні прогини в моделях №№ 2, 3, 4 перевищують гранично допустиме значення абсолютного прогину. Отже, в моделях №№ 2, 3, 4 умова перевірки за другою групою граничних станів не виконується й модель № 3, що має найменшу вагу, не може бути прийнята як певне конструктивне рішення. Зважаючи на умову достатньої жорсткості, оптимальним конструктивним вирішенням буде модель № 1. Різниця у вазі моделі № 1 (8,9 т) та моделі № 3 (8,33 т) з найменшою вагою становить 6,8 %.

**Ключові слова:** структурна плита, товщина плити, матеріалоемність, регулятор зусиль.

**Вступ.** Стержньові структури, зокрема структурні плити, характеризуються рядом переваг, насамперед, завдяки природі своєї будови. В основі кожної структурної плити можна виділити базовий просторовий елемент, що являє собою систему похилих та горизонтальних стержнів. Порядок цих стержнів є упорядкованим і нагадує кристали природнього походження графіт, алмаз.

Гранями правильних багатогранників, що також є відомими як тіла Платона, є плоскими правильними багатокутниками. Таких багатогранників можна виділити лише п'ять – тетраедр, октаедр, куб, додекаедр, ікосаедр. Будь-які з них або комбінації їх в просторі можуть бути базою або, інакше кажучи, формоутворюючим елементом для структурної конструкції [1].

Для утворення структурної плити такий базовий елемент слід скопіювати вздовж осей  $X$ ,  $Y$  необхідну кількість разів для утворення конструкції структурної плити.

Найбільш часто як базовий елемент використовуються в практиці проектування структурних плит тетраедр, куб, октаедр [1]. Так, з'єднавши однакових два тетраедра в одній вершині (верхній елемент буде симетричним відображенням нижнього) можна отримати простий формоутворюючий елемент структурної плити.

За своєю природою структурні плити, що є стержньово-вузловими конструкціями й утворені з базових елементів відрізняються ефективною статичною роботою стержнів конструкції, що під навантаженням зазнають зусиль розтягу чи стиску. Завдяки цьому сталь є найбільш придатним матеріалом для втілення таких структурних плит в життя.

Варіантів конструктивних рішень структур при заданих параметрах можна створити досить багато. Знаходження оптимальної конструкції за певним заданим критерієм є важливою й актуальною пошуковою задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В [1–11] наведено ґрунтовне та різнопланове дослідження «просторових сіток» або структур.

Ефективними конструкціями, що характеризуються невеликою матеріалоемністю й такими, що мають змогу перекривати великі прольоти, є структурні плити. Просторова стержньова конструкція структури дає можливість багатоваріантного проектування та пошуку нових раціональних форм.

Більшість структурних форм, у тому числі більшість вузлів просторової структури, є модульними.

Структурні конструкції – з криволінійною поверхнею чи з плоскою, є легкими, міцними, просторовими, модульними конструкціями масового виробництва. Автором ідеї таких конструкцій є Олександр Грем Белл. На початку 20 ст. він експериментував з просторовими фермами, що склалися з октаедричних та тетраедричних блоків [1].

В 1907 р. О. Беллом була побудована одна із перших структурних конструкцій – оглядова вежа в Бейн Бхреа (США). В цій конструкції застосовувалися литі вузли та трубчаті стержневі елементи [1].

Для зведення структурних конструкцій використовувалися також і готові модулі. У Великій Британії в 1950-х роках компанія Denings of Chard стала розробником системи Space Deck. Ця система передбачає болтове з'єднання збірних сталевих модулів пірамідальної конфігурації. Ці збірні модулі мають розміри в плані  $1,22 \times 1,22$  м та  $1,05$  м або  $0,61$  м в глиб відповідно [1].

Модуль, що є подібним до системи Space Deck, має також розміри в плані  $1,22 \times 1,22$  м, але із загальною глибиною  $0,6$  м. Такі модулі було прийнято для конструкцій покриття та перекриття в модульній будівельній системі Nenk 3. Ця система була розроблена у Великій Британії компанією Denings за замовленням Міністерства будівництва при будівництві казарм на початку 1960-х років [1].

Конрад Ваксман в 1959 р. розробив просторову структуру для ангарів літаків із великими прольотами для ВПС США. Технічне завдання вимагало великої гнучкості в конструкції, геометрії та типі будівлі, а також вимагало, щоб компоненти були придатними для повторного використання [1].

Система Конрада Ваксмана включала складний універсальний з'єднувач, що було виготовлено із комбінації стандартних кованих елементів в кількості чотири штуки. Це дозволило поєднувати до двадцяти трубчастих елементів у кожному з'єднанні [1].

В [2–11] наведено ґрунтовне та різнопланове дослідження «просторових сіток» або структур й сучасні конструктивні вирішення плоских та криволінійних покриттів, що

являють собою просторові стержньові структури покриття.

В [12] виконано числове дослідження з метою визначення найефективнішої за параметром матеріалоемності моделі структурної плити в залежності від характеру розташування опорних стійок та їх кількості.

Визначення оптимальної форми базового формоутворюючого елемента ґратчатої структури плити наведено в [13].

Питання оптимізаційного проектування структурних плит покриття є комплексним. Оптимальне конструктивне рішення може бути представлено як функція, що залежить від декількох факторів, що є змінними величинами й зміна хоча би одного з яких яких призводить до змін напружено-деформованого стану.

Так, вибір оптимальної висоти (товщини) плити є актуальною задачею проектування структур.

При призначенні висоти структурної плити із спільного розгляду умови стійкості верхніх й міцності нижніх поясів ( $N_{ma} \leq \varphi R_y A_{ma}$ ;  $N_{mi} \leq R_y A_{mi}$ ) та обмеження плити за прогинами ( $w_{max} \leq [ff]$ ) можна знайти мінімальну висоту структурної плити  $h_{min}$ . При такій товщині одночасно досягається граничний стан поясів за міцністю та стійкістю й також досягається граничний стан конструкції в цілому за деформаціями.

Якщо висоту структурної плити призначити більше ніж  $h_{min}$ , то прогини плити будуть меншими за ті, що дозволяються за [14], перший граничний стан конструкції буде виникати раніше, аніж другий. У цьому випадку при забезпеченні несучої здатності стержнів решітки стає можливим використання резерву несучої здатності поясів при пружнопластичній стадії їх роботи. Таким чином,  $h_{min}$  є також межею, вище якої можна враховувати розвиток пластичних деформацій, що рекомендується при проектуванні. Таке врахування призводить до зниження витрати матеріалів й зменшення кількості типорозмірів стрижнів.

**Метою** роботи є визначення за критерієм матеріалоемності найбільш ефективного конструктивного рішення структурної сталеві плити покриття розміром в плані 12,0×24,0 м з-поміж моделей, що досліджуються. Регулятором зусиль в моделях плит виступає параметр товщини (висоти) плити.

Для досягнення мети необхідно здійснити такі розрахункові **завдання**:

- 1) дослідити фактори, що впливають на зміну зусиль в стержнях плит;
- 2) прийняти один із змінних параметрів в якості регулятора зусиль в стержневих елементах структурної плити;
- 3) створення з використанням методу скінчених елементів із застосуванням ПК ЛІРА-САПР декілька скінченоелементних моделей, що будуть відрізнятися одна від одної лише одним параметром – товщиною (висотою плити);
- 4) прийняти (призначити в першому наближенні) в першій розрахунковій ітерації параметри жорсткості для всіх конструктивних груп стержневих елементів плити – призначити певні профілі труб для елементів для всіх варіантних моделей плити, що прийнято до аналізу та розрахунку;
- 5) виконати статичний розрахунок з жорсткостями першого типу (1-ша ітерація) всіх розрахункових моделей структурної плити;
- 6) на основі отриманих зусиль та переміщень узлів в модулі «Металеві конструкції» ПК ЛІРА-САПР підібрати нові скориговані розміри перерізів стержневих елементів плити;
- 7) обчислити згідно нових призначених перерізів стержневих елементів моделей плит вагу кожної моделі плити, що досліджується. Обрати модель, що характеризується найменшою вагою;
- 8) призначити нові параметри жорсткості, обчислені в модулі «Металеві конструкції» й виконати другий ітераційний статичний розрахунок моделей;
- 9) за новими даними після другого ітераційного розрахунку оцінити та порівняти параметри напружено-деформованого стану, відсоток використання перерізів за першою та другою групами граничних станів моделей плит, що досліджуються;
- 10) сформулювати висновки.

**Матеріали та методи дослідження.** Серед методів, що застосовувалися в цій роботі слід виділити наступні:

– метод скінчених елементів – для моделювання розрахункових моделей структурної плити в середовищі ПК Ліра-САПР. Метод також застосовано для визначення напружено-деформованого стану моделей, прийнятих до розрахунку;

– метод розрахунку сталевих елементів в модулі «Металеві конструкції» – для конструювання стержневих елементів структурних плит за методикою обраних норм конструювання [15], оцінки відсотку використання площі перерізу стержнів за 1 ГС та 2 ГМ норм [15].

**Результати дослідження.** *Алгоритм числового експерименту.* Висота плити є тим фактором (регулятором зусиль), що поряд з іншими факторами (спосіб розташування опор-стійок, створення попереднього натягу в затяжці нижнього поясі, штучне пониження рівня опор, зміна форми базового елемента-кристалу), суттєво впливає на перерозподіл зусиль в стержнях просторової структурної плити.

З метою визначення за параметром оптимальної висоти найбільш ефективного рішення структурної плити прийнято чотири варіанти плити, що відрізняються між собою лише товщиною (висотою) плити. Товщина плити варіюється в межах від  $(1/16 \div 1/24) l$  й прийнято такі товщини плити: 1,5 м; 1,3 м; 1,1 м; 0,9 м.

В рамках виконання числового експерименту планується здійснити такі етапи:

– Використовуючи ПК Ліра-САПР 2024 створити чотири скінченоелементні моделі структурної плити розміром в плані  $12,0 \times 24,0$  м, що відрізнялися би одна від одної лише одним параметром – товщиною плити ( $t = 1,5$  м;  $1,3$  м;  $1,1$  м;  $0,9$  м).

– В розрахунковій моделі виділено три конструктивних групи стержнів: елементи верхнього поясу, елементи нижнього поясу та елементи решітки (стержні та розкоси).

– При першій ітерації цим групам елементів призначено перерізи профілю з труб (табл. 1). Виконується статичний розрахунок для всіх чотирьох моделей структурних плит. За результатами статичного розрахунку та використовуючи модуль «Металеві конструкції» ПК Ліра-САПР за умовами міцності та стійкості (умовами першої групи граничних станів) та умовами деформативності (другої групи граничних станів) автоматично підбираються нові параметри жорсткості для груп стержнів плитної конструкції.

– Виконується другий ітераційний статичний розрахунок для чотирьох моделей структурної плити з новими жорсткостями перерізів елементів.

– Аналіз напружено-деформованого стану моделей структурної плити після другого ітераційного розрахунку.

– Аналіз відсотків використання площі перерізів згідно результатів підбору перерізів за першою та другою групами граничних станів.

– Обчислення ваги кожної моделі структури за результатами конструювання після другого ітераційного розрахунку.

– Визначення найбільш ефективного конструктивного рішення структурної плити з-поміж чотирьох її варіантів, що досліджувалися.

Таблиця 1 – Характеристики жорсткостей конструктивних елементів структурного покриття (при ітераційному розрахунку № 1)

Назва елемента	Поперечний переріз, см (ГОСТ 8732-78*)	E, т/м <sup>2</sup>	R, т/м <sup>3</sup>	μ	Марка сталі	q, т/м
1. Стержні верхнього поясу	Труба 114×20	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	C235	0,046
2. Стержні нижнього поясу	Труба 114×20	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	C235	0,046
3. Елементи решітки структурної плити	Труба 68×6	$2,1 \cdot 10^7$	7,85	0,3	C235	0,0092

Скінченоелементна модель структурної плити. В якості конструкції, що досліджується, прийнято структурну сталеву плиту (рис. 1) з розмірами в плані 12,0×24,0 м, тобто із відношенням сторін як 1:2.

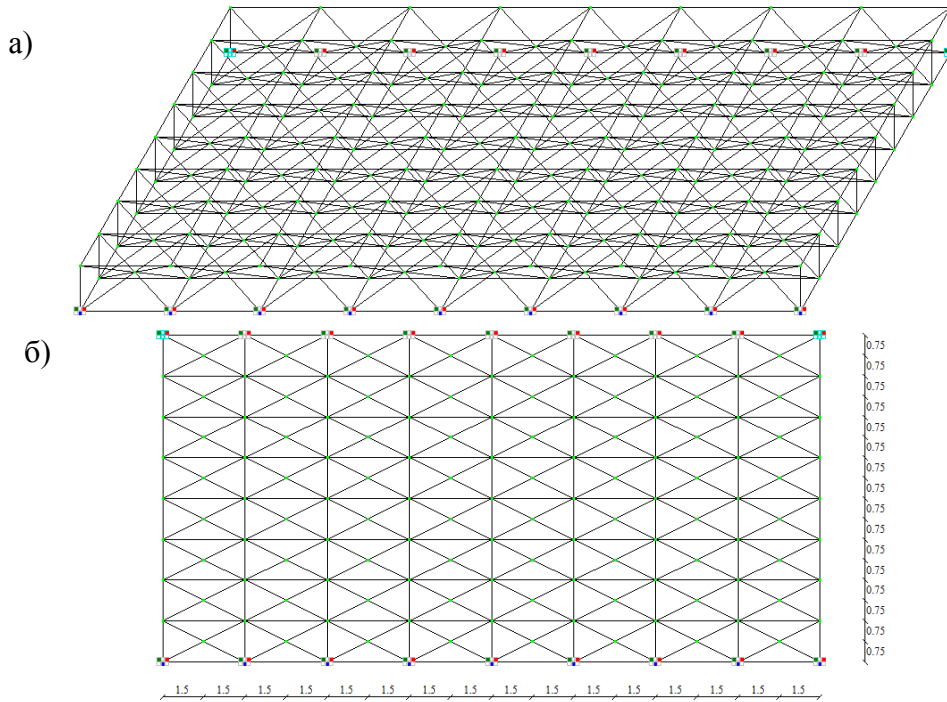


Рис. 1. Скінченоелементна модель структурної плити за схемою №1:  
а – ізометричний вигляд; б – вид конструкції в площині XOY

Плита має ортогональну сітку поясів з розміром плоскої ячейки поясу (верхнього та нижнього) – 1,5×3,0 м), рис. 2.

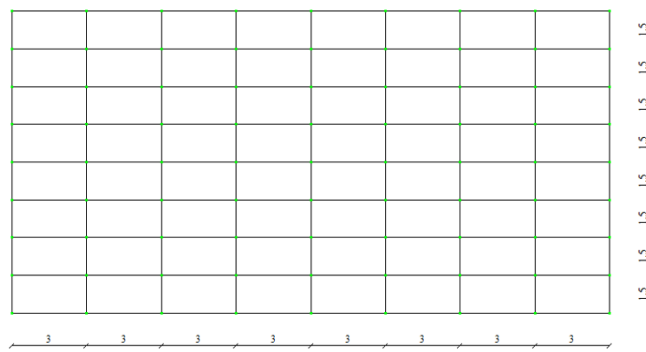


Рис. 2. Ортогональна сітка поясів (верхнього та нижнього)

Вузли верхнього та нижнього поясів з'єднані розкосами. За базовий елемент прийнято кристал за формою, наведеною на рис. 3. Він являє собою дві піраміди з прямокутною основою 1,5×3,0 м, й такі, що мають різний напрямок вершин і такі, що з'єднуються одна з одною у вершині.

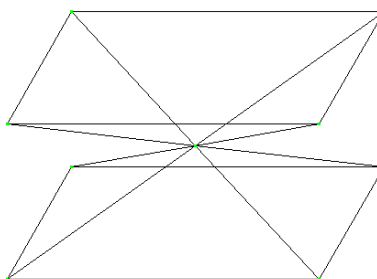


Рис. 3. Базовий елемент, що утворює структурну плиту

Розміри в плані, навантаження, що діє на плиту, вид базового формоутворюючого елементу, спосіб спирання прийнято як параметри, що не змінюються.

В якості обмежень прийнято умову міцності для стержнів, що працюють на розтяг, умова стійкості для елементів, що працюють на стиск, прийнято також обмеження за граничною гнучкістю [15] та граничний прогин конструкції [14].

За ознакою схеми №5 (схема загального вигляду) із стержневих елементів загального типу (СЕ № 10) змодельовано скінченоелементну схему структурної плити (рис. 1).

Для всіх моделей структурної плити прийнято шарнірне спирання по двом довгим сторонам (рис. 1, а). Робота конструкції під навантаженням є однонаправленою. З'єднання всіх стержньових елементів є шарнірним. Переріз для елементів всіх груп прийнято із труби безшовної гарячекатаної за ГОСТ 8732-78\*).

Оскільки ухил елементів верхнього поясу структури становить  $\alpha < 30^\circ$ , то прийнято розподіл снігового покриву як рівномірний по всьому покриттю.

Прийнято три типи завантаження: завантаження № 1 (постійне, власна вага структури), завантаження № 2 (постійне, власна вага конструктивних шарів покрівлі), завантаження № 3 (тимчасове, снігове навантаження).

*Аналіз результатів розрахунку.* На рис. 4 наведено графіки переміщень вздовж осі Z в поздовжньому перерізі після першого ітераційного розрахунку. На рис. 4, б наведено деформовану схему плити за моделлю № 1.

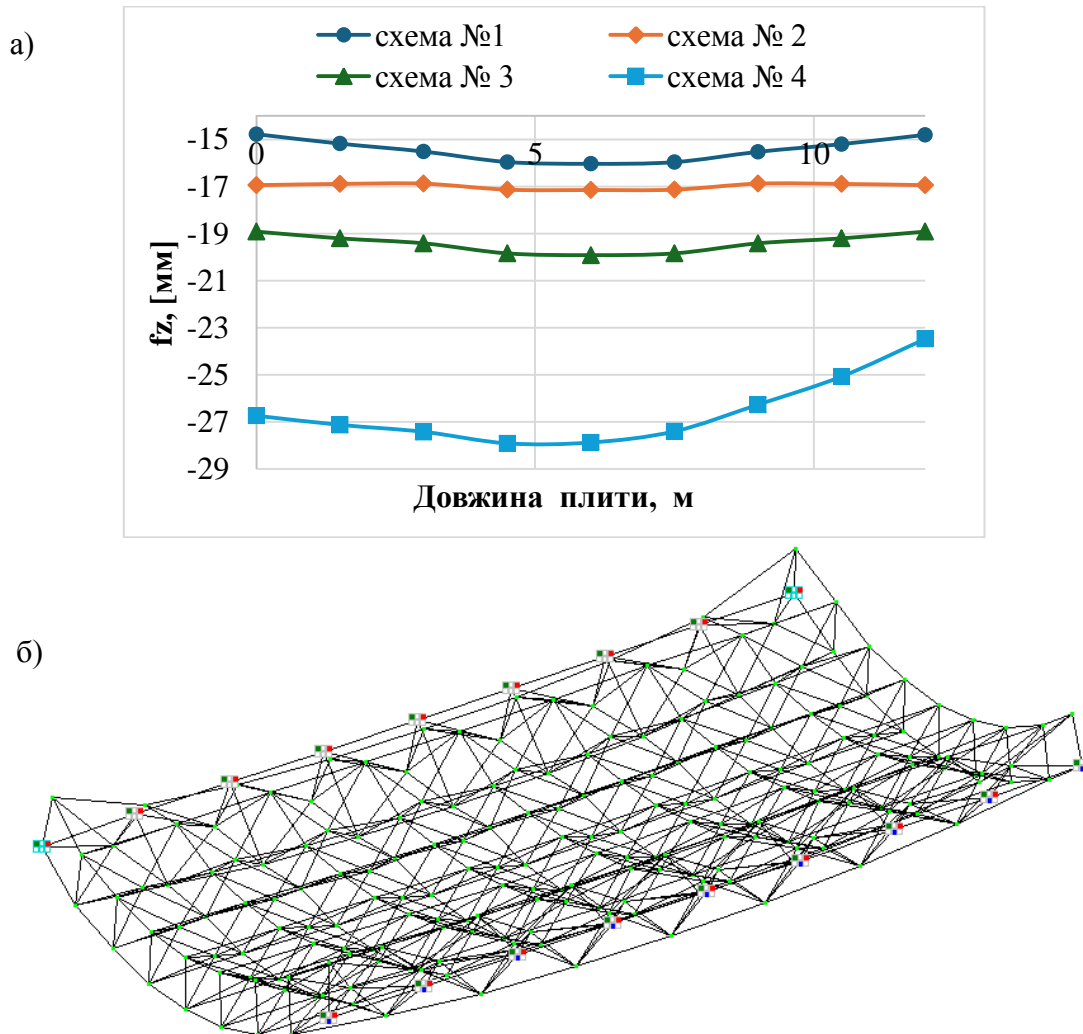


Рис. 4. Результати розрахунку за другою групою граничних станів:  
 а – переміщення вздовж осі Z в поздовжньому перерізі після 1-го ітераційного розрахунку;  
 б – деформована схема № 1 (плита товщиною 150 см) після 1-го ітераційного розрахунку

Очевидно, що з жорсткостями перерізів, прийнятими в першому наближенні, у всіх моделях деформативність є меншою за величину гранично допустимого прогину  $f_u=4,8$  см (рис. 4, а).

На основі зусиль, обчислених при жорсткостях 1-го типу (табл. 2), було визначено зусилля та деформації всіх моделей плит. На рис. 5 наведено епюри внутрішніх зусиль  $N$  для певних типів конструктивних груп стержнів для окремих схем плит від РСН2.

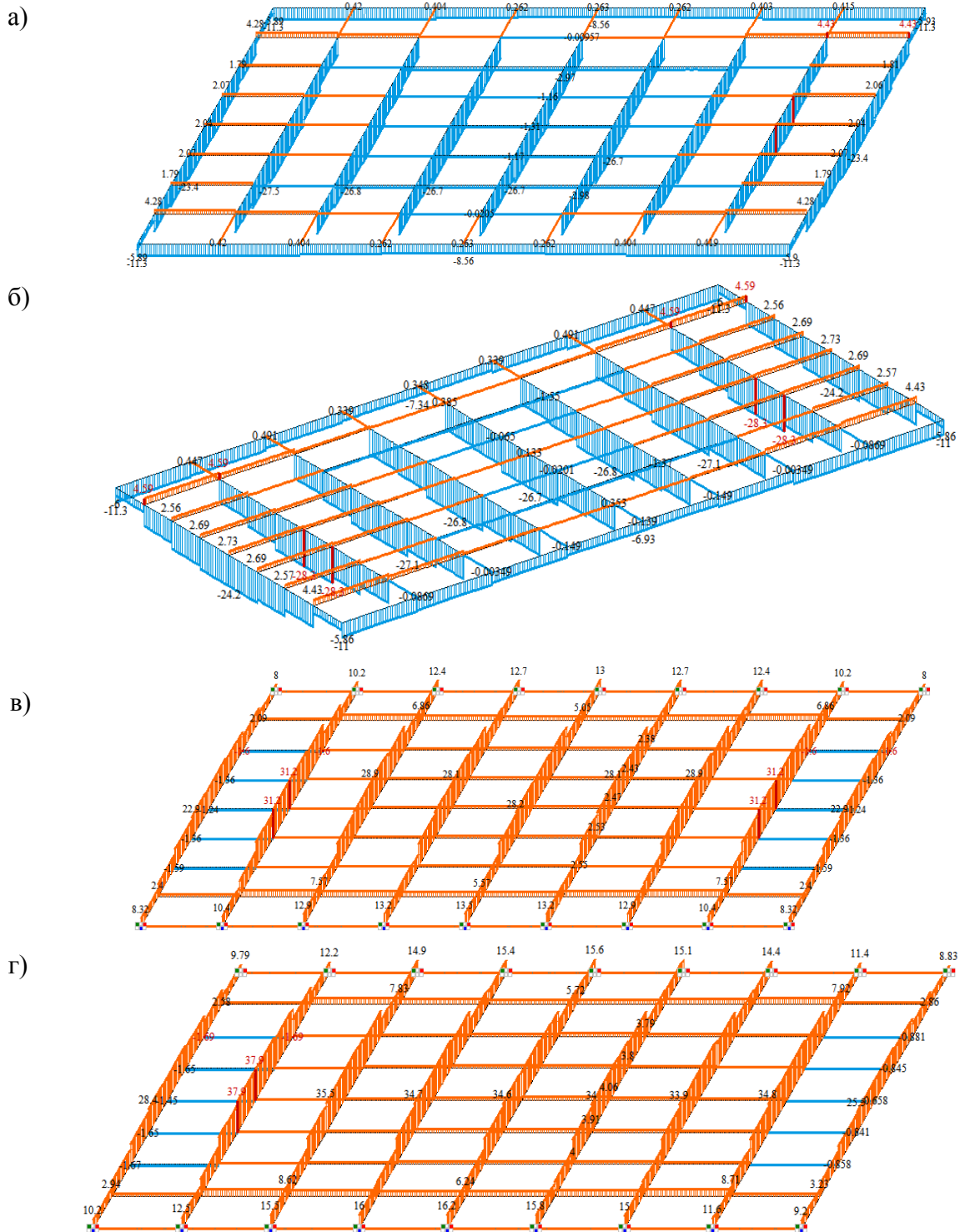


Рис. 5. Зусилля  $N$  у верхньому поясі структури після першого ітераційного розрахунку від РСН2: а – в схемі №1; б – в схемі №2; в – зусилля  $N$  у нижньому поясі структури після першого ітераційного розрахунку від РСН2 в схемі №3; г – в схемі №4

На основі результатів статичного розрахунку автоматизовано в модулі «Металеві конструкції» з урахуванням параметрів конструювання та згідно призначених параметрів матеріалу було перераховані нові розміри трубчатих перерізів елементів моделей структур. Розрахунок виконувався згідно норм [15] й за виконанням умов 1-ї т 2-ї груп граничних станів запропоновано нові профілі (табл. 2-4) для всіх конструктивних груп стержнів.

Таблиця 2 – Жорсткості елементів верхнього поясу, прийняті за результатами ітераційного розрахунку № 1

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	C235	ТБ102×4	0,00849859	324	2,75
2	C235	ТБ102×3,5	0,00849859	324	2,75
3	C235	ТБ102×4	0,00849859	324	2,75
4	C235	ТБ127×4	0,0121285	324	3,93

Таблиця 3 – Жорсткості елементів нижнього поясу, прийняті за результатами ітераційного розрахунку № 1

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	C235	ТБ102×3,5	0,00849859	324	2,75
2	C235	ТБ102×3,5	0,00849859	324	2,75
3	C235	ТБ89×4,5	0,00937371	324	3,04
4	C236	ТБ108×5	0,0126955	324	4,11

Таблиця 4 – Жорсткості елементів решітки, прийняті за результатами ітераційного розрахунку № 1

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
1	C235	ТБ83×3,5	0,00685926	495,48	3,40
2	C235	ТБ83×3,5	0,00685926	484,2	3,32
3	C235	ТБ76×3	0,00539867	470,36	2,54
4	C235	ТБ89×3,5	0,00737694	461,64	3,41

Після призначення нових параметрів жорсткості для елементів плити (табл. 4), виконаємо другий ітераційний розрахунок. В таблиці 5 наведено дані щодо переміщень вузлів відносно осі Z в поперечному перерізі моделей плити після першої та другої ітерації.

Таблиця 5 – Переміщення  $f_z$  після 1-го та 2-го ітераційних розрахунків в поздовжньому перерізі

Проліт, м	Схема №1		Схема №2		Схема №3		Схема №4	
	Ітер. 1	Ітер. 2	Ітер. 1	Ітер. 2	Ітер. 1	Ітер. 2	Ітер. 1	Ітер. 2
0	-14,78	-36,33	-16,95	-45,05	-18,92	-52,68	-26,74	-55,79
3	-15,18	-38,92	-16,89	-46,02	-19,21	-54,66	-27,13	-57,35
6	-15,52	-41,23	-16,88	-47,25	-19,42	-56,58	-27,42	-59,04
9	-15,96	-43,16	-17,14	-48,58	-19,84	-58,57	-27,91	-60,64
12	-16,04	-43,67	-17,15	-48,91	-19,92	-59,06	-27,88	-60,87
15	-15,97	-43,17	-17,14	-48,58	-19,84	-58,57	-27,41	-59,67
18	-15,53	-41,26	-16,88	-47,25	-19,42	-56,58	-26,27	-56,76
21	-15,20	-38,97	-16,89	-46,02	-19,21	-54,66	-25,07	-53,14
24	-14,81	-36,40	-16,95	-45,05	-18,92	-52,68	-23,48	-48,93

На рис. 6 наведено максимальні переміщення вузлів  $f_z$  в скінченоелементних схемах за двох ітерацій.

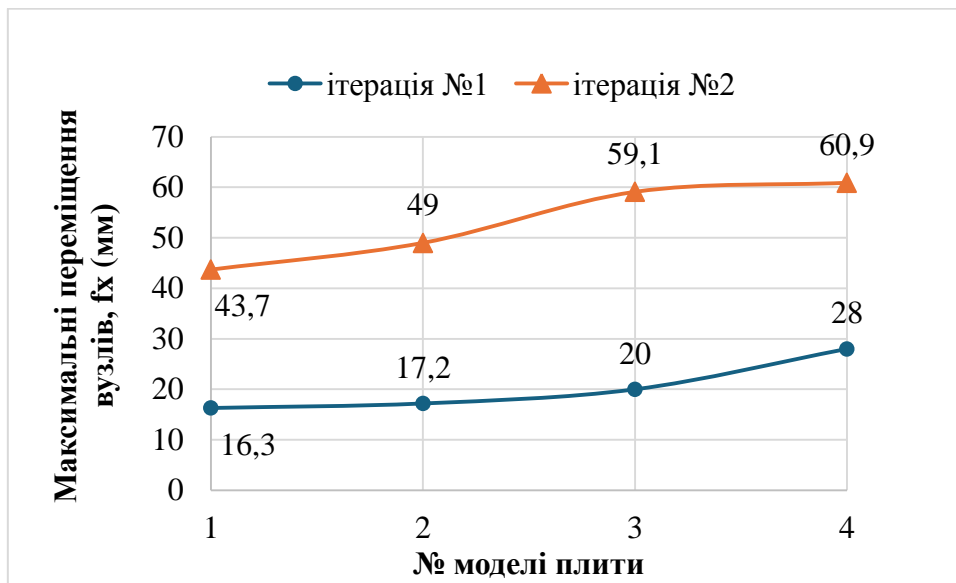


Рис. 6. Максимальні переміщення вузлів  $f_z$  в скінченоелементних схемах при двох ітераціях

Відсоток використання перерізів всіх груп конструктивних поясів за умовами першої групи граничних станів після другого ітераційного розрахунку в порівнянні з першим ітераційним розрахунком збільшилися від 20 % до 100 %.

Для кожної групи конструктивних елементів як уніфікований, єдиний профіль було прийнято максимальні діаметр профілю труби, запропонований в постпроцесорі «Металеві конструкції». Згідно нових профілів труби було підраховано вагу кожної конструктивної моделі. Підрахунок ваги моделей наведено в табл. 6-9.

Таблиця 6 – Вага схеми плити схеми №1

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
Верхній пояс	C235	ТБ102×4	0,00849859	324	2,75
Нижній пояс	C235	ТБ102×3,5	0,00849859	324	2,75
Розкоси	C235	ТБ83×3,5	0,00685926	495,48	3,40
<b>Всього:</b>					<b>8,91</b>

Таблиця 7 – Вага схеми плити схеми №2

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
Верхній пояс	C235	ТБ102×3,5	0,00849859	324	2,75
Нижній пояс	C235	ТБ102×3,5	0,00849859	324	2,75
Розкоси	C235	ТБ83×3,5	0,00685926	484,2	3,32
<b>Всього:</b>					<b>8,83</b>

Таблиця 8 – Вага схеми плити схеми №3

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
Верхній пояс	C235	ТБ102×4	0,00849859	324	2,75
Нижній пояс	C235	ТБ89×4,5	0,00937371	324	3,04
Розкоси	C235	ТБ76×3	0,00539867	470,36	2,54
<b>Всього:</b>					<b>8,33</b>

Таблиця 9 – Вага схеми плити схеми №4

№ схеми	Сталь	Профіль труби	Вага 1м.п. профілю, т	Довжина стержнів поясу, м	Вага, т
Верхній пояс	C235	ТБ127×4	0,0121285	324	3,93
Нижній пояс	C236	ТБ108×5	0,0126955	324	4,11
Розкоси	C235	ТБ89×3,5	0,00737694	461,64	3,41
<b>Всього:</b>					<b>11,45</b>

На рис. 7 наведено графічну ілюстрацію підрахунку ваги моделей плити в таблицях 6-9.

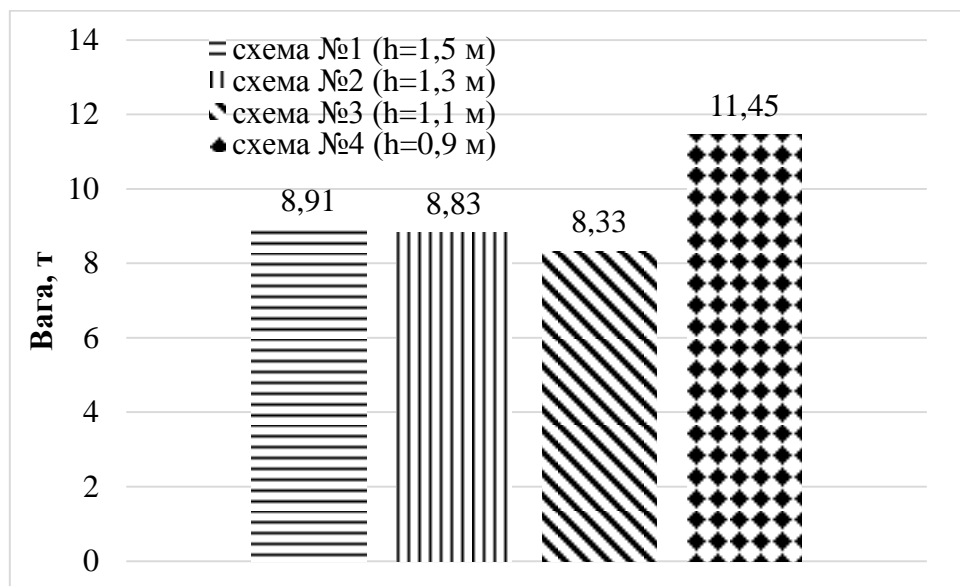


Рис. 7. Вага моделей структурної плити згідно нових розмірів перерізу, підібраних після 1-го ітераційного розрахунку

**Висновки.** Так, із таблиць 6–9 видно, що найменша вага буде у моделі № 3 з висотою в 1,1 м. Найбільшою вагою характеризується модель № 4 з висотою 0,9 м. Різниця у вазі цих плит з найменшою та найбільшою вагою становить 1,37 рази.

Отже, за критерієм матеріалоємності, найбільш ефективною з-поміж варіантів, що досліджувалися, є модель плити за схемою № 3.

Але, зважаючи на результати порівняння максимальних прогинів конструкції із гранично допустимими їх значеннями ( $f_u=4,8$  см), модель конструкції за схемою № 3 не задовольняє умовам перевірки за другою групою граничних станів. Отже, модель № 3 не може бути прийнята в якості одного із варіантів конструктивного рішення структурної плити.

Оскільки лише за умовою жорсткості прийнятною є схема № 1 (висота 1,5 м), то цю модель приймаємо як єдино можливу та найбільш ефективну.

**Перспективи досліджень.** На рис. 7 наведено максимальний відсоток використання перерізів за результатами другої ітерації, але відсоток кількості стержнів, що входить до такої групи з максимальним відсотком використання площі перерізу, є незначним (до 2 %).

Для більш детального і оптимального конструювання слід зробити ще декілька розрахункових ітерацій з метою, щоб якомога більший відсоток в конструктивних групах стержнів структури мав якомога повне використання площі перерізу.

Також, з метою більш точного конструювання, вже на другій ітерації слід за декількома діапазонами зусиль  $N$  сформувати групи стержнів, для яких було би прийнято відповідний новий профіль труби й провести декілька ітераційних розрахунків до моменту, коли у більшій кількості стержнів конструктивної групи відсоток використання перерізу буде значним (>50 %). Це дозволить суттєво зменшити вагу плити, хоча й збільшить кількість типорозмірів стержнів в усіх конструктивних групах стержнів.

### Література

1. Chilton J. Space Grid Structures. Routledge, 2007. URL: <https://doi.org/10.4324/9780080498188> (date of access: 16.04.2024).
2. The principle of space frame steel structure construction. *Space frame*. URL: <https://www.safsteelstructure.com/news/the-principle-of-space-frame-steel-structure-construction/> (date of access: 16.04.2024).
3. Space Frame Components of Space Frame System Types of Space Frame Advantages & Disadvantages of Space Frame Structure Space Frame Structures Examples. *CivilJungle*. URL: <https://civiljungle.com/space-structure/> (date of access: 16.04.2024).
4. Ashtul S.A., Patil S.N. Review on Study of Space Frame Structure System. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2020. Vol. 07, no. 04. P. 667–672. URL: <https://www.irjet.net/archives/V7/i4/IRJET-V7I4137.pdf> (date of access: 16.04.2024).
5. Facilitator C. Space Frame Structure; an analysis of its benefit - Constro Facilitator. *Constro Facilitator*. URL: <https://constrofacilitator.com/space-frame-structure-an-analysis-of-its-benefit/> (date of access: 16.04.2024).
6. Balke H. Räumliche Tragwerke. *Einführung in die Technische Mechanik*. Berlin, Heidelberg, 2010. P. 91–98. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10398-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10398-8_8) (date of access: 16.04.2024).
7. The Editors of Encyclopaedia Britannica. Space frame Steel Structures, Modular Design & Prefabrication. *Encyclopedia Britannica*. URL: <https://www.britannica.com/technology/space-frame> (date of access: 16.04.2024).
8. Li Z. X. Structure Mechanics Analysis with Different Construction Schemes in Large-Span Space Grid Structure. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 788. P. 534–537. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.788.534> (date of access: 16.04.2024).
9. Construction process analysis for a single-layer folded space grid structure in considering time-dependent effect / Z. Zhou et al. *International Journal of Steel Structures*. 2012. Vol. 12, no. 2. P. 205–217. URL: <https://doi.org/10.1007/s13296-012-2005-y> (date of access: 16.04.2024).
10. Dzwierzynska J. Shaping of Spatial Steel Rod Structures Based on a Hyperbolic Paraboloid. *Archives of Civil Engineering*. 2018. Vol. 64, no. 4. P. 309–320. URL: <https://doi.org/10.2478/ace-2018-0076> (date of access: 16.04.2024).
11. Luo Y., Xue Y. Recent development and engineering practices of space grid structures in China. *International Journal of Space Structures*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1177/09560599241228934> (date of access: 16.04.2024).
12. Напружено-деформований стан структурної плити / N. Sribniak та ін. *ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2020. № 2 (55). С. 35–43. URL: <https://doi.org/10.26906/znp.2020.55.2339>.

13. Determining the optimal size of the basic element in a space grid structure / L. Tsyhanenko et al. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*. 2023. Vol. 12, no. 2023.12. P. 201–208. URL: <https://doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.22> (date of access: 16.04.2024).
14. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. На заміну СНиП 2.01.07-85; чинний від 2007-01-01. Вид. офіц. Київ : Мінбуд України, 2006. 14 с.
15. 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](https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=58106) (дата звернення: 16.04.2024).

### References

- [1] J. Chilton, *Space Grid Structures*. Routledge, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4324/9780080498188>. Accessed on: April 16, 2024.
- [2] The principle of space frame steel structure construction. *Space frame*. URL: <https://www.safsteelstructure.com/news/the-principle-of-space-frame-steel-structure-construction>. Accessed on: April 16, 2024.
- [3] Space Frame. *CivilJungle*. URL: <https://civiljungle.com/space-structure>. Accessed on: April 16, 2024.
- [4] S.A. Ashtul, S.N. Patil, "Review on Study of Space Frame Structure System", *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 07, no. 04, pp. 667–672, 2020. [Online]. Available: <https://www.irjet.net/archives/V7/i4/IRJET-V7I4137.pdf>. Accessed on: April 16, 2024.
- [5] C. Facilitator, Space Frame Structure; an analysis of its benefit – *Constro Facilitator*. URL: <https://constrofacilitator.com/space-frame-structure-an-analysis-of-its-benefit>. Accessed on: April 16, 2024.
- [6] H. Balke, *Räumliche Tragwerke, Einführung in die Technische Mechanik*. Berlin, Heidelberg, 2010. pp. 91–98. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10398-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10398-8_8). Accessed on: April 16, 2024.
- [7] The Editors of Encyclopaedia Britannica. Space frame Steel Structures, Modular Design & Prefabrication. *Encyclopedia Britannica*. [Online]. Available: URL: <https://www.britannica.com/technology/space-frame>. Accessed on: April 16, 2024.
- [8] Z.X. Li, "Structure Mechanics Analysis with Different Construction Schemes in Large-Span Space Grid Structure", *Advanced Materials Research*, vol. 788, pp. 534–537, 2013. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.788.534>. Accessed on: April 16, 2024.
- [9] Z. Zhou et al., "Construction process analysis for a single-layer folded space grid structure in considering time-dependent effect", *International Journal of Steel Structures*, vol. 12, no. 2, pp. 205–217, 2012. URL: <https://doi.org/10.1007/s13296-012-2005-y>. Accessed on: April 16, 2024.
- [10] J. Dzwierzynska, "Shaping of Spatial Steel Rod Structures Based on a Hyperbolic Paraboloid", *Archives of Civil Engineering*, vol. 64, no. 4, pp. 309–320, 2018. URL: <https://doi.org/10.2478/ace-2018-0076>. Accessed on: April 16, 2024.
- [11] Y. Luo, Y. Xue, "Recent development and engineering practices of space grid structures in China", *International Journal of Space Structures*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1177/09560599241228934>. Accessed on: April 16, 2024.
- [12] N. Sribniak et al., "Napruzeno-deformovanyi stan strukturnoi plyty", *ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering*, no. 2 (55), pp. 35–43, 2020. URL: <https://doi.org/10.26906/znp.2020.55.2339>. Accessed on: April 16, 2024.
- [13] L. Tsyhanenko et al., "Determining the optimal size of the basic element in a space grid structure", *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, vol. 12, no. 2023.12, pp. 201–208, 2023. URL: <https://doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.22>.

Accessed on: April 16, 2024.

- [14] DSTU B V.1.2-3:2006. Prohyny i peremishchennia. Vymohy proektuvannia. Na zaminu SNyP 2.01.07-85. Vyd. ofits. K: Minbud Ukrainy, 2006.
- [15] DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruksii. 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. Vyd. ofits. K: Minrehion Ukrainy, 2014. URL: [https://budstandart.ua/normativ-document.html?id\\_doc=58106](https://budstandart.ua/normativ-document.html?id_doc=58106). Accessed on: April 16, 2024.

### STRUCTURAL SLAB OPERATION STUDY

<sup>1</sup>**Sribniak N.M.**, Ph.D., Associate Professor,  
nataliya.sribnyak.17@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3205-433X

<sup>1</sup>**Tsyhanenko L.A.**, Ph.D., Associate Professor,  
tsyhanenkola@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6628-3635

<sup>1</sup>**Halushka S.A.**, Senior Lecturer,  
galushka\_sa@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2789-8570

<sup>1</sup>**Tsyhanenko H.M.**, Senior Lecturer,  
tsyhanenkogm@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3335-4804

<sup>1</sup>*Sumy National Agrarian University*  
Gerasima Kondratieva st., 160, Sumy, 40000, Ukraine

**Abstract.** A number of factors affect the redistribution and value of axial forces in the cores of structural slabs, such as the location and quantity of supports, the presence or absence of prestress in the structure, the shape of the base crystal of the slab, which is the forming element, and the height (thickness) of the slab, which can be varied within certain permissible limits. A change in one of these features with the rest of the parameters remaining unchanged significantly changes the stress-strain state of the structure. The paper describes the description of finite element models of a structural grid slab with a plan dimension of 12.0×24.0 m. Four models of the slab are adopted, differing only in one parameter – the thickness of the structure. The following values of the structure height were adopted: 1.5 m (model No. 1), 1.3 m (model No. 2), 1.1 m (model No. 3), 0.9 m (model No. 4). The analysis and design of all models were performed, which were accepted. New profiles of the structural groups of rods were selected so that they met the check conditions for the first and second groups of limit states and the percentage of rod cross-section utilisation was as high as possible. The maximum deflections of the models after the analysis were compared. The lowest weight as an optimality criterion is the most common criterion for structures, in particular metal structures, as this criterion is quite easy to formalise.

The weight of each slab model was calculated and it was found that the optimal design solution is model No. 1 with a height of 1.5 m, since only for this model the deformability is within the permissible limits. The model characterised by the lowest weight is model No. 3, but the maximum vertical deflection of this structure is greater than the maximum limit.

In conclusion, the analysis of the displacements of the slab model nodes revealed that only the maximum deflection of the slab in model No. 1 does not exceed the maximum permissible deflection of 4.8 cm. The maximum deflections in models No. 2, 3, 4 exceed the maximum permissible value of the absolute deflection. Consequently, the check condition for the second group of limit states is not met in models 2, 3, and No. 4, and model No. 3, which has the lowest weight, cannot be recognised as the most effective among the others. Considering the condition of sufficient stiffness, the optimal design solution is model No. 1. The difference in weight between model No. 1 (8.9 tonnes) and model No. 3 (8.33 tonnes) with the lowest weight is 6.8 %.

**Key words:** space grid slab structure, plate thickness, material capacity, force regulators.

Стаття надійшла до редакції 26.04.2024

**MECHANOCHEMICAL ACTIVATION OF PORTLAND CEMENT AND ITS INFLUENCE ON THE THERMOMECHANICAL CHARACTERISTICS OF CEMENT-WATER COMPOSITIONS AND SOLUTIONS BASED ON THEM**

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

<sup>1</sup>**Davidchuk V.G.**, graduate student,  
oldsnakes19@gmail.com, ORCID: 0009-0001-5425-4327

<sup>1</sup>**Streltsov K.A.**, Ph.D., Associate Professor,  
0989051837@ukr.net, ORCID: 0000-0021-5463-7395

<sup>1</sup>*Odessa State Academy of Construction and Architecture*  
st. Didrikhsona, 4, Odessa, 65029, Ukraine

**Abstract.** Issues discussed in the article related to determining the influence of mechanical activation in a rotary high-speed mixer of cement-water compositions and solutions based on them. Relevant for this study is the activation of cement in combination with the consumption of ground quartz sand ( $S = 250 \text{ m}^2/\text{kg}$ ), the amount of which was adjusted in the range from 0 to 40 % of the cement mass. The use of this technology, along with reducing cement consumption, ensures acceleration of the processes of cement hydration and intensification of exothermic heating of the hardening composition. Mechanical activation is also reflected in the acceleration of the loss of mobility of cement-water compositions filled with ground sand. The presented experimental data made it possible to evaluate the influence of the activation times (90 and 180 sec) of the binder on the diameter of the spread of the aqueous cement-containing composition. It has been established that the main contribution (up to 90 % of the total value) to the decrease in the water-binder ratio (provided that equal-viscosity compositions are obtained) is achieved when the cement-containing composition is activated for 90 seconds. Subsequent activation of the binder (up to 180 sec) has a slight effect on the growth of the diameter of the composition spread and does not exceed 5-10 %.

The exothermia of the hardening cement-water composition determined by the thermos method indicates a significant influence of mechanical activation both on the kinetics and on the achievement of the maximum temperature of its heating. The introduction of ground sand does not change the overall picture of the effect of mechanical activation on exothermic heating, changing only the decrease in intensity and the decrease in maximum heating of the cement-water composition.

The influence of mechanical-chemical activation of Portland cement with the addition of quartz sand on the strength of a 1:1 mortar at 3 and 7 days of age was revealed. Experimental studies indicate a positive effect of binder activation on the compressive strength of the mortar. The increase in strength of samples using mechanically activated cement reached 15-25 % compared to the control.

**Key words:** mechanical activation, rotary high-speed mixer, activation, exothermic heating, water-binder ratio, ground quartz sand.

**Introduction.** Along with the traditional use of surfactants in the composition of a mortar or concrete mixture, a promising method for improving the physical and mechanical characteristics of hardened composites is the mechanochemical activation of Portland cement. Ensuring a high degree of cement activation is effectively achieved through the use of special activators, which dramatically increase the potential capabilities of the binder. It is the use of such activators that makes it possible to obtain cement composites of increased strength and durability.

**Analysis of the latest research and publications.** Improving the properties of cement stone and concrete based on it is an extremely important and urgent task. Among the various ways to

solve the problem [1-7], mechanical-chemical methods of activating the binder [8-12] deserve attention.

The existing various methods of activating the hydration processes of cement compositions have one technological goal, namely, to control the processes of structure formation and physical and mechanical properties of materials [13-17]. In the practice of preparing mortar and concrete mixtures, turbulent high-speed mixers of various designs are widely used [18-20].

Their use helps solve a set of issues related to both improving the homogeneity of the freshly prepared mixture and increasing the strength of cement stone and concrete based on it [21, 22].

The use of high-speed hydrodynamic mixing to activate cement in combination with an optimal amount of ground quartz sand in terms of consumption ensures acceleration of cement hardening processes and intensification of exothermic heating, which makes it possible to abandon both thermal treatment and the use of fast-hardening cements.

**Purpose of the study.** The above stated determined the purpose of this work, which is to determine the effect of mechanical activation on the thermomechanical properties of cement-water compositions and solutions based on them.

**Research methods.** Activation of Portland cement and a mixture of Portland cement with ground sand (mixed binder) was carried out by intensive processing of the aqueous cement and cement-sand composition in a rotary high-speed mixer. The use of a rotary mixer ensures physical and chemical activation of both Portland cement grains and ground quartz sand.

In a turbulent flow, both physical and chemical dispersion of binder particles and ground sand grains are ensured, as well as stripping of new growth products from the surface of a part of the cement. Thus, the activation of Portland cement and a mixture of binder with ground sand will affect both the acceleration of the exotherm of the hardening cement-water composition and the increase in the strength of the mortar in the early stages of hardening. To activate the cement, a specially designed high-speed turbulent type mixer with a working body speed of 1800 rpm was used. The work also determined the effect of mechanical activation on viscosity, which was assessed based on the results of the spreading of the cement-water composition on the Suttard device.

To record the exothermic heating of cement-containing compositions, a thermos was used, which is a glass flask with double walls, between which a vacuum was created. The fluctuation in room temperature during the determination of exothermic heating did not exceed  $\pm 1.5$  °C. To record the temperature, a mercury thermometer was used, located in the center of the sample using a copper tube half filled with transformer oil. The temperature was recorded every 30 minutes until the next heating value did not change or was lower than the previous one.

To determine the effect of mechanical activation and the amount of ground sand in the binder on compressive strength, cement-sand samples measuring  $4 \times 4 \times 16$  cm were prepared.

The mixture was obtained by mixing one part of the binder with one part of non-milk quartz sand with  $Mkr = 2.2$ . The amount of mixing water was determined by the mobility of the mortar mixture (the spread of the mixture cone was 105...110 mm) after 30 shaking on the table.

**Research results.** In the studies, Portland cement PC II/A-Sh-500 was used as a binder (manufacturer – LLC "Cement", Khutorskaya str., 70, Odessa, Ukraine). Portland cement meets the requirements of DSTU B V.2.7-46:2010 "Cements for general construction purposes. Technical conditions." The production of cement-sand binder was carried out by joint grinding of Portland cement and quartz sand in amounts of 20 and 40%. Quartz sand from the Aleksandrovsy quarry in the Odessa region in  $Mkr = 2.2$  was used as a filler for the mortar.

To determine the effective viscosity and exothermic heating, the compositions of cement-containing compositions given in Table 1 were used. The experimental conditions provided for the production of equal-viscosity cement-containing compositions with a cone spread in the range of  $120 \pm 5$  mm.

Analysis of the experimental data given in Table 1 indicates that the activation of an aqueous cement-containing composition within 180 sec. allows you to obtain a given spread on the Suttard device at low values of the water-binder ratio. The main contribution to the decrease in the water-

binder ratio is provided by the activation of the cement-containing composition for 90 seconds. Thus, for the composition (cement + water) the activation period increases from 0 to 90 seconds leads to a decrease in the water-cement ratio from 0.387 to 0.351, i.e. by more than 10 %. A further increase in the activation period (from 90 to 180 seconds) causes a decrease in the water-binder ratio by no more than 1.5 % (from 0.351 to 0.346).

Table 1 – Compositions of cement-containing components

№	Portland cement, %	Ground sand, %	B/B	Activation of an aqueous solution of mixed binder, sec.
1	100	0	0.387	0
2	100	0	0.351	90
3	100	0	0.346	180
4	80	20	0.348	0
5	80	20	0.320	90
6	80	20	0.313	180
7	60	40	0.325	0
8	60	40	0.298	90
9	60	40	0.284	180

It should also be noted the influence of mechanical activation on the water-binder ratio for cement-water compositions with the addition of ground quartz sand in amounts of 20 and 40 %. Compatible grinding of Portland cement with the addition of 20 and 40 % quartz sand causes a decrease in the water-binder ratio to 0.348 and 0.324 (while ensuring a given spread of the mixture cone), respectively – there is no activation of the composition (cement + ground sand + water). Mechanical-chemical activation of a cement-water composition in a high-speed mixer with the addition of 20% ground sand (by weight of cement) for 180 seconds helps reduce the water-binder ratio from 0.348 (no activation) to 0.313, that is, by almost 12 %, and with the addition of 40 % ground sand by 14 % (from 0.324 to 0.284).

As for the influence of the period of mechanical activation of aqueous cement-containing compositions on the diameter of the spread of the mixture cone and exothermic heating, it should be noted that for all the compositions under consideration there is a tendency towards faster thickening of mixtures, the activation period of which increases, Table 2.

Table 2 – Effect of activation period and content of ground sand in the binder on the kinetics of reducing the diameter of the cone spread

Hardening time of the CWC, hour	Cone spread of cement-containing compositions (CWC), mm								
	№ composition of cement-containing compositions								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	120	120	120	120	120	120	120	120	120
0.5	112	108	106	112	109	108	117	113	110
1.0	107	96	94	108	103	100	113	110	97
1.5	106	87	85	106	99	97	109	103	89
2.0	105	80	74	104	96	94	106	96	83
2.5	98	71	61	100	92	89	102	91	73
3.0	89	60	-	94	85	82	97	85	62
3.5	77	-	-	87	76	73	90	77	-
4.0	63	-	-	78	63	60	84	-	-

The experimental results of exothermic heating of cement-water compositions are given in Table 3.

The experimental results obtained indicate the presence of an induction period for heating the cement-water composition both on Portland cement that is not subject to mechanical activation (this period is approximately 5 hours from the moment of mixing cement with water) and on Portland cement that is subject to mechanical activation.

Table 3 – Effect of mechanical activation period on exothermic heating of cement-water compositions

Composition number	Content of ground quartz sand in the binder, %	Activation period, sec.	Temperature of exothermic heating of compositions, °C, in one hour											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	19.0	19.0	20.5	21.3	22.3	25.0	30.0	37.5	40.5	47.0	47.7	46.5
2	0	90	20.0	21.0	23.5	26.0	28.5	33.0	38.4	45.7	50.0	48.2	45.5	-
3	0	180	20.0	22.1	24.8	27.2	31.0	37.0	40.0	49.2	52.4	49.0	46.8	-
4	20	0	18.0	18.0	18.0	20.4	21.0	21.5	24.6	26.6	31.0	33.0	34.5	34.0
5	20	90	19.0	19.0	20.5	22.5	24.5	25.6	30.5	33.2	35.2	37.0	37.0	36.5
6	20	180	19.0	19.3	21.9	24.2	26.2	27.5	32.8	37.5	37.5	38.0	38.0	37.5
7	40	0	18.0	19.0	19.5	19.6	20.9	22.1	24.5	27.0	28.5	30.0	31.2	30.0
8	40	90	19.0	19.0	19.5	21.2	22.5	25.8	27.6	30.7	32.3	33.5	34.5	34.0
9	40	180	19.0	20.3	22.3	23.7	25.7	28.4	31.3	32.8	34.0	35.5	35.5	35.2

A graphical display of the kinetics of exothermic heating of a hardening activated cement-water composition (NN compositions – 1, 2, 3) is shown in Fig. 1.

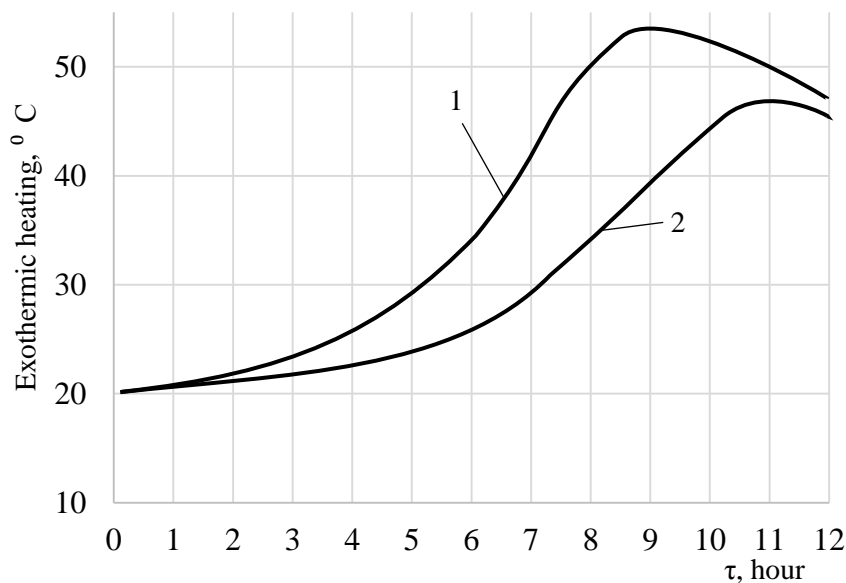


Fig.1. The effect of mechanical-chemical activation on exothermic heating of a cement-water composition:

1 – cement-water composition activated for 180 seconds; 2 – control

In this case, the induction period was no more than 2 hours. At the end of the induction period, a relatively sharp increase in the temperature of the hardening cement-water composition is observed, reaching a maximum value (52.4 °C) 9 hours after mixing the cement with water.

For the cement-water composition, which is not subject to mechanical activation, the maximum heating did not exceed 47.7 °C, and the peak heating occurred no earlier than 11 hours from the moment of preparation of the cement-water composition. A similar effect of mechanical activation on the kinetics of exothermic heating is observed for cement-water compositions with the addition of 20 and 40% ground quartz sand.

The final stage of the study was to determine the effect of mechanical-chemical activation and consumption of ground quartz sand on the compressive strength at the age of 3 and 7 days of beam samples made from 1:1 mortar.

Compressive strength of samples at the age of 3 and 7 days, depending on:

1) manufacturing technology: a) the use of mechanical activation of the binder; b) control – the binder was not subjected to mechanical activation;

2) the content of ground quartz sand in the binder (0; 20; 40%) indicates that mechanical activation is a useful technological effect on the strength characteristics of the mortar, Table 4.

Table 4 – Effect of mechanical activation period on exothermic heating of cement-water compositions

Hardening period of cement-sand mortar, days	Compositions of cement-containing components								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Compressive strength of mortar, MPa								
3	32.3	35.7	36.7	20.7	24.5	25.5	17.6	20.9	22.1
7	40.5	48.3	50.5	25.7	30.0	31.2	23.7	26.7	28.1

An increase in the strength of the solution due to mechanical activation of the binder provides a real opportunity to reduce the consumption of Portland cement, while ensuring the necessary properties of the final product.

**Conclusions:**

1. The use of mechanical-chemical activation of aqueous cement-containing compositions leads to a decrease in their viscosity, which makes it possible to reduce the water ratio by an average of 10...14 %.

2. Mechanical-chemical activation of aqueous cement-containing compositions causes an increase in both the rate of exotherm and an increase in the maximum heating temperature.

3. The use of mechanical-chemical activation promotes an increase in the compressive strength of cement-sand mortars at 3 and 7 days of age (at all studied consumption of ground quartz sand) by an average of 15...25 % (compared to the control).

**References**

[1] Runova R.F., Kosovsky Yu.L. Technology of modified mortars. Kyiv: KNUSA, 2007, 256 p.  
 [2] Koval S.V. Modeling and optimization of the composition and properties of modified concrete. Odessa: Astroprint, 2012, 424 p.  
 [3] Dvorkin L.I. and others Effective technologies of concrete and mortars with hardening of technogenic raw materials / L.Y. Dvorkin, V.V. Zhitkovsky, V.V. Marchuk, Y. Stasyuk, M.M. Violinist. Monograph. Rivne: NUVKhp, 2017, 424 p.

- [4] Sanitsky M.A., Kropivnitskaya T.P., Gevyuk V.M. Fast-hardening clinker-effective cements and concretes. Monograph. Lviv: Prostir-M LLC, 2021, 206 p.
- [5] Solodky S.Y. Crack resistance of concretes based on modified cements/ S.Y. Solodky// Lviv: Publication of the National Institute "Lviv Polytechnic". 2008. -144 p.
- [6] Vyrovoy V.N. Composite building materials and structures. Structure, self-organization, properties / V.N. Vyrovoy, V.S. Dorofeev, V.G. Sukhanov//Odessa: Publishing house "TES", 2010. 176 p.
- [7] Runova R.F. Construction materials of the new generation and technologies of their implementation in construction/ R.F. Runova, V.I. Hotz, M.A. Sanytskyi et al./ K: UVPK "Ex Ob", 2008. 360p.
- [8] Barabasch I.V., Babiy I.M., Streltsov K.O. Intensive individual technology and its impact on the properties of cement -Water compositions, solutions and concretes on their base // Modern structure and architecture, Issue N2. Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2022. P. 44-51.
- [9] Shpirko M.V., Dubov T.M. Study of the effect of electromagnetic activation of a concentrated cement suspension on the properties of cement stone and concrete / Bulletin of PDABA, 2020, N2 (263-264). pp. 102-107.
- [10] Gots V.I. Concrete and mortars Kyiv: UVPK Eks Ob, 2003. 468 p.
- [11] Fedorkin S.I. Mechanical activation of secondary raw materials in the production of building materials. /Simferopol: Tavria, 1997. 180 p.
- [12] Dvorkin L.I., Dvorkin O.L., Garnitsky Yu.V. Modified ash-containing dry construction mixtures for stone and adhesive mortars. NOOOOT. Smooth. 2013. 325 p.
- [13] Heinicke G. Tribochemistry. Per. from German, 1987. 584 p.
- [14] Charnetsky L. The future of concrete / L. Charnetsky, V. Kurdovsky // IX International. science and practice conference: Zaporizhzhia, 2007. – pp. 13–21.
- [15] Rusyn B.G. High-performance concretes based on Portland cement modified with ultradisperse mineral additives: author. thesis for obtaining sciences. Art. Ph.D. for special 05.23.05/ NU "Lviv Polytechnic". Lviv. 2014. 21 p.
- [16] Aktivation des Betonanmachwasser. / A. Kudyahow, G. Semyonova, Y. Sarkisow [etc.] // Tagungsbericht, Band 2. Weimar, Deutschland, 1997. S.20501 – 20507.
- [17] Bratchun V. I., Zaichenko L. G. Optimization of factors of electromagnetic activation of concrete mixtures / Bulletin of OGASA: Odessa, 2005. Vol. No. 20. pp. 40-46.
- [18] Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in concrete - a review / Construction and Building Materials, 2010. V. 24. P. 2060-2071.
- [19] Kondratyeva N.V. Nanotechnologies in the production of construction materials / N.V. Kondratieva / Construction of Ukraine, 2012. No. 6. pp. 2-9.
- [20] Maslov A.G. Development of an installation for vibromechanical processing of building mixtures / A.G. Maslov, Yu.S. Salenko, E.V. Stukota // Bulletin of the Kharkov National. highway un-ta. Vol. 57, 2012. P.59-62.
- [21] Vyrovov V.N. et al. Mechanical activation in concrete technology. OGASA. 2014.148 p.
- [22] Usherov-Marshak A.V., Kabus A.V. Functional-kinetic analysis of the influence of additives on the hardening of cements / Inorganic materials, 2016. Volume 52, N4. pp. 479-484.

**МЕХАНОХІМІЧНА АКТИВАЦІЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ І ЇЇ ВПЛИВ  
НА ТЕРМО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕМЕНТНО-ВОДНИХ КОМПОЗИЦІЙ  
ТА РОЗЧИНІВ НА ЇХ ОСНОВІ**

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

<sup>1</sup>**Давідчук В.Г.**, аспірант,  
oldsnakes19@gmail.com, ORCID: 0009-0001-5425-4327

<sup>1</sup>**Стрельцов К.О.**, к.т.н., доцент,  
0989051837@ukr.net, ORCID: 0000-00021-5463-7395

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

**Анотація.** Розглянуті у статті питання пов'язані з визначенням впливу механоактивації у роторному швидкісному змішувачі цементно-водних композицій та розчинів на їх основі. Актуальним для даного дослідження є активація цементу в поєднанні з витратою меленого кварцового піску ( $S = 250 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), кількість якого корегувалася в діапазоні від 0 до 40% маси цементу. Застосування даної технології забезпечує, поряд із зниженням витрати цементу, прискорення процесів гідратації цементу та інтенсифікації екзотермічного розігріву тверднучої композиції. Віддзеркалюється механоактивація також на прискоренні термінів втрати рухливості, наповнених меленим піском, цементно-водних композицій. Наведені експериментальні дані дозволили оцінити вплив термінів активації (90 та 180 сек) в'язучого на діаметр розпливу водної цементно-вміщуючої композиції. Встановлено, що основний вклад (до 90% загального значення) в зниження водо-в'язучого відношення (при умові одержання рівнов'язких композицій) досягається при активації цементно-вміщуючої композиції протягом 90 сек. Подальша активація в'язучого (до 180 сек) незначно впливає на зростання діаметру розпливу композиції і не перевищує 5-10 %.

Визначена термосним методом екзотермія тверднучої цементно-водної композиції свідчить про значний вплив механоактивації як на кінетику, так і на досягнення максимальної температури її розігріву. Введення меленого піску не змінює загальної картини впливу механоактивації на екзотермічний розігрів, змінюючи лише зменшення інтенсивності та зниження максимального розігріву цементно-водної композиції.

Виявлено вплив механо-хімічної активації портландцементу з добавкою кварцового піску на міцність будівельного розчину складу 1:1 у 3-х та 7-и добовому віці. Експериментальні дослідження свідчать про позитивний вплив активації в'язучого на міцність при стиску розчину. Зростання міцності зразків на механоактивованому цементі досягало 15-25 % в порівнянні з контролем.

**Ключові слова:** механоактивація, роторний швидкісний змішувач, активація, екзотермічний розігрів, водо-в'язуче відношення, мелений кварцовий пісок.

Стаття надійшла до редакції 29.05.2024

**OPTIMIZATION OF ACCELERATED CARBONIZATION HARDENING EFFECTS OF EXPANDED CLAY CONCRETE**<sup>1</sup>**Gara O.A.**, Ph.D., Professor,

gara@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2413-1860

<sup>1</sup>**Kolesnykov A.V.**, Ph.D., Associate Professor,

kolesnikov\_himek@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8737-0933

<sup>1</sup>**Semenova S.V.**, Ph.D., Associate Professor,

semenova@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5309-5854

<sup>1</sup>**Oliinyk T.P.**, Ph.D., Associate Professor,

oleynik\_himek@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4469-6797

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

**Abstract.** The paper examines the data obtained during the study of accelerated carbonization hardening of expanded clay concrete. The mechanisms and methods of carbonization hardening, the influence of recipe and technological factors on strength characteristics are considered. The most significant of them were the consumption of the binder, the relative amount and granulometry of the filler (ground limestone) and aggregate (keramzite), the concentration of the plasticizing additive (SYM) and the technological parameters of carbonization – the maximum pressure and time of carbonization. The nature of the influence of the relevant properties on the strength characteristics is considered. The results of the planned and implemented experiment were studied using the methodology of response surfaces. Experimental-statistical models of compressive strength were built for 1 hour, 28 days and 180 days from the end of the carbonation procedure. The degrees of influence of various factors are determined. Constructed dependencies were displayed using a series of diagrams of isolines of strength at the limit values of three factors of weak influence. The proposed hypothesis is that in experimental-statistical models of the properties of materials closely related to their structure, a tendency to simplification is created when the corresponding materials pass through the stage of structure formation. Insignificant components of the experimental-statistical model, mainly related to the interaction of factors determining the structure of the material, are reduced. Corresponding transformations arise, in particular, for constructed strength models. Two tasks of optimizing the long-term strength of expanded clay concrete are formulated. The first task is related to the elimination of hard additional constraints during optimization, while the long-term strength reaches its maximum. The second engineering-based task contains additional requirements for the economical use of binder and the convenience of the carbonization process. The distributions of the parameters of the desirability function were determined for both tasks. As a result of the optimization, two main sets of recipe-technological factors and corresponding properties of composite materials were obtained.

**Keywords:** accelerated carbonization hardening, experimental planning, optimality according to the combined criterion, desirability function.

**Introduction.** Accelerated carbonation hardening (ACH) is a promising solution to the problems of increasing the durability and strength of concrete structures. Traditional methods of curing concrete, such as steam curing or the use of chemical additives often require long curing periods and may have environmental or economic disadvantages. Thus, more than 10 million tons of conventional fuel, including more than 3 billion cubic meters of gas, is spent annually on heat treatment in the European Union. The coefficient of use of heat and fuel due to the imperfection of the technological process is 5...11%. In contrast, accelerated carbonisation offers a sustainable and effective approach to improving the properties of concrete. Its application has a significant ecological component related to the fixation of atmospheric carbon dioxide CO<sub>2</sub>. ACH technology is associated with the injection of CO<sub>2</sub>, which reacts with non-hydrated components of the cement composite [1], which leads to the transformation of absorbed CO<sub>2</sub> into various forms of stable

carbonates [2]. This method is better than natural or weathered carbonation, because the natural diffusion of atmospheric CO<sub>2</sub> through the pores of concrete or mortar occurs very slowly [3]. ACH technology accelerates the rate of carbonization and increases the net amount of sequestered CO<sub>2</sub> [4]. In addition, ACH process conditions can be adjusted in a controlled environment (usually in a carbonization chamber) [5]. Thus, the main task of promoting ACH concrete as a carbon dioxide sequestration strategy is to ensure conditions under which carbonation does not impair mechanical strength, as well as other operational properties. The explanation of the environmental and economic efficiency of ACH is clearly visible in the following examples.

Consider the construction of a reinforced concrete bridge in harsh environmental conditions. ACH can significantly reduce the time required for the concrete to reach design strength, which allows shortening the construction period and minimizing traffic disruptions. Moreover, the increased durability provided by carbonation can extend the life of the bridge, reducing maintenance costs and ensuring long-term structural integrity.

In urban areas where space and resources are limited, accelerated carbonation techniques can be particularly useful. For example, in the construction of high-rise buildings, the use of ACH can accelerate the hardening process, which will allow developers to meet a tight project deadline and optimize the use of resources. In addition, the increased durability of carbonized concrete can increase the resistance of high-rise structures to the effects of environmental factors and seismic phenomena, ensuring the safety of passengers and reducing the risk of expensive repairs or upgrades in the future. Accelerated carbonation also provides environmental benefits due to the binding of carbon dioxide within the concrete matrix. This ability to capture and store carbon dioxide contributes to the reduction of greenhouse gas emissions, which meets the goals of sustainable development and regulatory requirements in the construction industry.

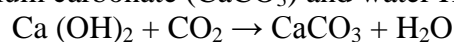
Thus, the implementation of ACH concrete serves several purposes, including reducing construction time, increasing structural strength, optimizing resource use, and promoting environmental sustainability. ACH optimization methods allow to achieve the corresponding goals in the most effective way.

**Analysis of recent research and publications.** Existing studies have shown that accelerated carbonization can significantly improve the mechanical properties of concrete, including compressive strength, flexural strength, and abrasion resistance [6]. Research results indicate that carbonized concrete exhibits higher compressive strength compared to conventionally cured concrete, with improvements ranging from 10% to 50% depending on carbonation conditions and concrete mix composition. It was also shown that ACH increases the durability of concrete by reducing permeability and increasing resistance to the penetration of chlorides, the action of sulfates, and the alkali-silica reaction [7]. In addition, the improvement of the long-term characteristics of carbonized concrete structures, the reduction of maintenance requirements and the increase of service life observed in the field [8] are shown.

ACH of cement composites contains complex mechanisms that occur both at the macroscopic and microscopic levels inside the concrete matrix [9]. Understanding these mechanisms is necessary to optimize the efficiency and effectiveness of accelerated carbonation methods. The mechanisms causing ACH have several key processes:

1. *Diffusion of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>).* The process of accelerated carbonation begins with the diffusion of CO<sub>2</sub> into the structure of the porous concrete matrix. The presence of moisture inside the pores facilitates the transport of CO<sub>2</sub>, allowing it to penetrate deeper into the concrete [10].

2. *Chemical reactions.* Carbon dioxide upon contact with calcium hydroxide (Ca(OH)<sub>2</sub>) present in hydrated cement paste undergoes a number of chemical reactions. The primary reaction [11] includes the formation of calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) and water H<sub>2</sub>O:



In the course of this reaction, calcium hydroxide is consumed and calcium carbonate is formed, which leads to the deposition of calcite crystals in the pores of concrete.

3. *Propagation of the carbonization front.* As carbonation progresses, a carbonation front forms inside the concrete matrix, delineating the boundary between carbonized and non-carbonated areas. The advancement of this front is influenced by factors such as CO<sub>2</sub> concentration, moisture

content, temperature, and pore structure [12].

4. *Formation of calcium carbonate crystals ( $\text{CaCO}_3$ )*. Precipitation of calcium carbonate crystals occurs in the pores of the concrete matrix. These crystals contribute to compaction of the microstructure by filling voids and internodal spaces. The re-formed calcium carbonate acts as a binder, binding the cement particles and aggregates together, thereby increasing the overall strength and durability of the concrete.

5. *Formation of calcium silicate hydrate (CSH)*. In addition to calcium carbonate, accelerated carbonation also contributes to the formation of a calcium silicate hydrate (CSH) gel. This gel serves as the main binding phase in cement hydrated dough and is responsible for the mechanical properties of concrete [13]. The formation of CSH caused by carbonation contributes to the compaction and strengthening of the concrete matrix.

6. *Thinning of pores and microstructural changes*. The deposition of calcium carbonate and the formation of CSH gel lead to the crushing of the porous structure within the concrete matrix. Such grinding of pores reduces the permeability of concrete, limiting the ingress of harmful substances such as chlorides and sulfates. In addition, microstructural changes caused by accelerated carbonization contribute to increased resistance to chemical action and environmental degradation.

7. *Decrease in alkalinity and decrease in pH*. As carbonation progresses, the alkalinity of the concrete matrix decreases due to the consumption of calcium hydroxide. Such a decrease in pH can have the effect of increasing the susceptibility to corrosion of collateral steel reinforcement [14]. However, the formation of a protective layer of calcium carbonate on the surface of the reinforcement can reduce the risk of corrosion of carbonized concrete.

8. *Long-term effects and aging*. The effectiveness of accelerated carbonation in the long term depends on factors such as exposure conditions, concrete composition and maintenance methods [15]. Monitoring the performance of carbonized concrete structures over time is necessary to assess their durability and ensure structural integrity.

Thus, the mechanisms of accelerated carbonation of cement composites contain a number of interconnected processes, including  $\text{CO}_2$  diffusion, chemical reactions, pore crushing, microstructural changes, and alkalinity changes. Together, these mechanisms contribute to increasing the strength, durability and stability of concrete, which makes accelerated carbonation a promising method of improving the characteristics of binding materials in various construction applications [16].

**The purpose of the work** is an analysis of previously obtained experimental data on the effect of binder consumption, plasticizing additive content, limestone content, carbonation pressure ( $\text{CO}_2$ ), carbonation process time on compressive and tensile strength at the age of 1 day, 28 days and 180 days, as well as the construction of ES-models, their conceptual interpretation and optimization by the methods of the desirability function, taking into account the technologically justified distribution of degrees of importance and the technological conditions of conducting ACH.

**Research methodology** consists in the application to the previously obtained experimental data of the planning of the experiment [17], in particular, the methodology of ES-modeling and response surfaces, as well as the apparatus of the desirability function [18], intended for the quantitative optimization of recipe and technological factors. All applied methods were implemented using the Design Expert software package [19].

**Research results.** Accelerated carbonation hardening (ACH) of concrete-based composites is a process that stimulates an accelerated reaction between carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) and hydrated cement in concrete, resulting in the formation of calcium carbonates and strengthening of the concrete matrix. From a technological point of view, the ACH technique can be divided into the following stages:

1. *Surface preparation*. Before starting the process of accelerated carbonation, the surface of the concrete must be cleaned of impurities and processed to ensure uniform penetration of  $\text{CO}_2$ .

2. *Installation of a device for accelerated carbonation*. For the process of accelerated carbonation, special equipment is used, such as a chamber with controlled  $\text{CO}_2$  content or a  $\text{CO}_2$  injection system.

3. *Regulation of environmental conditions*. The temperature and humidity of the environment can significantly affect the rate of the carbonation reaction. Therefore, it is important to maintain

optimal conditions to ensure effective penetration of CO<sub>2</sub> into the concrete matrix.

4. *CO<sub>2</sub> injection.* CO<sub>2</sub> is injected into the middle of the concrete structure using special equipment. This can happen through holes located on the surface of the concrete, or with the use of special channels and pipelines laid inside the concrete structure.

5. *Process control and monitoring.* When performing accelerated carbonation, it is important to control and adjust process parameters such as CO<sub>2</sub> content, temperature, humidity, and exposure time. This helps to ensure uniform and effective penetration of CO<sub>2</sub> throughout the thickness of the concrete and achieve the desired hardening characteristics.

6. *Evaluation of results.* After the accelerated carbonization process is completed, the results are evaluated, which includes an analysis of the mechanical properties of concrete, its structure, and the degree of carbonization.

In order to ensure high de-decking strength of concrete within 30...60 minutes, it is necessary to use carbonation regimes characterized by excessive pressure. According to the theory of heat and mass transfer, a significant acceleration of the carbonization process can be achieved by intensively supplying a gaseous reagent to the reaction zone. From this point of view, preliminary vacuuming of freshly formed concrete allows to create a porous capillary system that is under rarefaction. After that, pressure drops in the initial period of hardening caused by the removal of vacuum and the creation of excess pressure during the supply of carbon dioxide cause stress relaxation in the capillary structure of concrete, which leads to effective self-absorption and intensification of the carbonation process. The process of "carbonate" dissolution of the original minerals is accelerated in proportion to the pressure of carbon dioxide. At the same time, the use of modes with a high pressure value allows you to control the processes of structure formation of cement compositions.

Based on the results of previous studies and literature data [20], expanded clay concrete with an optimal aggregate structure and consumption of binder 300 kg/m<sup>3</sup> of concrete was chosen as the basic composition. The properties of the concrete mixture, as well as the structure and properties of hardened concrete depend most on the relative content of fine fractions in the aggregate (up to 5 mm). It was established that by changing the relative content of small fractions, it is possible to vary all the main properties of lightweight concrete within certain limits – strength, density, modulus of elasticity, thermal conductivity, etc.

The structure of carbonized concrete and its strength characteristics should be considered in relation to three main factors:

- aggregate structure, which depends on the location of the porous aggregate in the concrete structure;
- the concentration of the binder, which depends on the type and on the regularity of the properties of cement and its additives;
- consumption of mixing water, taking into account the features of the carbonization technology.

In connection with the influence on the structure formation process of a complex of recipe-technological and physico-chemical factors, the construction and technical properties of concrete can vary widely. Under conditions of carbonization, as a result of the simultaneous action of a number of structure-forming and destructive factors, the hardening process can develop with different speed and completeness of the reactions. In order to control the technological process, which allows to ensure optimal conditions of carbonization hardening, it is necessary to identify and study the degree and nature of the influence of the main recipe and technological parameters on the initial strength of after expanded clay concrete carbonization and for the strength during the period of operation of the products. In this case, the criterion for optimizing the recipe and technological conditions for the preparation of carbonized-hardening expanded clay concrete can be taken to be the minimum consumption of cement, which ensures the specified properties of the material, as the most expensive and scarce component.

The factors that largely determine the regulated physical and mechanical properties of expanded clay concrete carbonization hardening were adopted as variable recipe-technological factors, namely: binder consumption, sulfite-yeast mash (SYM) additive content, percentage content of ground limestone in the binder, as well as carbonization parameters.

The binder consumption was varied in the range from 300 to 500 kg/m<sup>3</sup>. Such a narrow interval of variation in the consumption of the binder is due to the fact that the percentage content of ground limestone in the binder, which was changed in the interval from 0 to 30%, was taken as one of the factors. In this regard, the actual consumption of cement in the experiment varied from 200 to 500 kg/m<sup>3</sup>, which covers almost the entire strength range of light concrete within the limits of permissible norms of cement consumption.

The introduction of crushed limestone into the binding composition is due to the need to reduce the consumption of cement, in addition, it should lead to the intensification of the carbonation process and cause structural changes that improve the mechanical characteristics of the system.

The introduction of the SYM plasticizing additive into the concrete mixture was considered as a technological technique that ensures the reduction of the total water content of the concrete mixture at the stage of its preparation, which is one of the ways of intensifying the carbonation process. The content of the SYM additive was varied in the experiment in the range from 0 to 0.4% of the weight of the binder.

Carbonation of freshly formed concrete samples was carried out in the mode of gradually increasing pressure, the effectiveness of which was shown in [20]. At the same time, the amount of carbon dioxide pressure at the main stage of the regime was varied in the range from 0.6 to 1.2 MPa. The choice of the upper limit is dictated by the nominal value of pressure for which industrial autoclaves used in the construction industry are designed.

The duration of the processing regime was varied from 30 to 60 minutes, based on technological considerations. An increase in the carbonization time contradicts the formulated goal of research related to the development of an effective mobile technology for the production of wall products, subject to a sharp reduction in the duration of hardening.

In order to build mathematical models that reflect the influence of the specified factors on the strength of carbonized expanded clay concrete in the design terms of the tests, a five-factor plan of the second order of the "Hartley-5" type with six points in the center of the plan was implemented. The factors and their levels of variation are given in the Table 1.

Table 1 – Factors and their levels of variation

Factors		Unit measurement	Code	Levels of variation		
				-1	0	+1
A	Binder consumption	kg/m <sup>3</sup>	Knitt	300	400	500
B	Contents of the SYM additive	%	SYM	0	0.2	0.4
C	The content of ground limestone binder	%	GL	0	15	30
D	The amount of carbonation pressure	MPa	PCO <sub>2</sub>	0.6	0.9	1.2
E	The duration of the carbonization process	min	tCO <sub>2</sub>	30	45	60

In the experiment, expanded clay concrete of the optimal fractional composition, determined for the conditions of carbonization hardening, were used. The matrix of planning and consumption of expanded clay concrete mixture components is presented in [20].

The research was carried out on cube samples with the size of an edge 10 cm. Molded samples were subjected to carbonization according to the appropriate modes. When testing the samples, the density of concrete, the consumption of carbon dioxide for the carbonation of the samples (according to the change in the weight of the samples before and after carbonization), and the compressive strength of the samples during control test periods.

Study of compressive strength R<sub>c</sub> (MPa) of the material after carbonation 1 hour (R1h), 28 days (R28) and 180 days (R180) led to the following results (Table 2).

Table 2 – Compressive strength of carbonized lightweight aggregate concrete

No	Factors					Rc, MPa			No	Factors					Rc, MPa		
	A	B	C	D	E	R1h	R28	R180		A	B	C	D	E	R1h	R28	R180
1	-1	-1	-1	-1	-1	3.3	7	8.3	17	-1	0	0	0	0	6.1	8.2	9.4
2	1	-1	-1	-1	1	10.5	18.6	22.5	18	1	0	0	0	0	13.5	20	23
3	-1	1	-1	-1	1	4.5	7.8	10.3	19	0	-1	0	0	0	7.8	11.2	12
4	1	1	-1	-1	-1	10.9	21.8	26.1	20	0	1	0	0	0	9.6	13.4	14.2
5	-1	-1	1	-1	1	2.1	4.6	6.5	21	0	0	-1	0	0	8.8	13.3	15
6	1	-1	1	-1	-1	8.5	15.4	18.7	22	0	0	1	0	0	7.8	10.9	12.4
7	-1	1	1	-1	-1	4.5	7	8.5	23	0	0	0	-1	0	7	12.7	14.2
8	1	1	1	-1	1	12.5	19	22.3	24	0	0	0	1	0	9.6	12.3	13.4
9	-1	-1	-1	1	1	7.3	8.2	8.9	25	0	0	0	0	-1	8	12.1	13.7
10	1	-1	-1	1	-1	12.5	18.2	22.3	26	0	0	0	0	1	9	12.3	13.9
11	-1	1	-1	1	-1	5.7	7	8.5	27	0	0	0	0	0	8.8	12.7	13.9
12	1	1	-1	1	1	16.5	20.6	23.5	28	0	0	0	0	0	8.4	12.2	14.2
13	-1	-1	1	1	-1	4.1	3.8	5.9	29	0	0	0	0	0	9.2	13.2	13.6
14	1	-1	1	1	1	11.7	14.6	18.1	30	0	0	0	0	0	9.1	13.1	13.4
15	-1	1	1	1	1	6.1	7	8.7	31	0	0	0	0	0	8.5	12.7	13.9
16	1	1	1	1	-1	13.7	18.2	20.9	32	0	0	0	0	0	8.8	12.3	14.4

The value of concrete strength in the experiment varies from 2.1 to 16.5 MPa 1 hour after carbonization, from 4.6 to 21.8 MPa at the age of 28 days and from 5.9 to 26.1 MPa at the age of 180 days. The obtained data made it possible to build ES-models of the properties of the composite material, for which the *Design Expert* package was used [19]. One of the useful features of this program is the ability to download "historical" data, that is, data obtained according to an experiment plan built and implemented previously outside of this package. The response surface methodology was used in data analysis. The type of obtained models, as well as some of their statistical characteristics, is shown in Table 3. The selection of statistically significant components was carried out at  $\alpha = 0.1$  by splitting in the reverse order (Backward elimination).

All models are statistically significant. The predicted coefficients of determination (Predicted  $R^2$ ) are consistent with the adjusted coefficient of determination (Adjusted  $R^2$ ). The signal-to-noise ratio corresponding to Adequate Precision is much greater than the desired value of 4, which indicates the adequacy of the signal. High values of  $R^2$  indicate the acceptability and high quality of the models. Let's consider and interpret each model separately.

*Compressive strength R1h (MPa) at the age of 1 hour after carbonization.* We will first assess the degree of influence of each factor on the analyzed strength characteristic at the central point of the plan using the perturbation diagram (Fig. 1).

A perturbation diagram allows you to compare the effects of all factors at a certain point in plan space and search for those factors that have the greatest effect on the response. The feedback shown in the diagram is constructed by varying only one factor over its range while holding the other factors fixed. A steep slope or curvature of the curve of the corresponding factor shows that the response is sensitive to changes in that factor. So, from Fig. 1, it can be seen that the consumption of cement (Knitt, A), the pressure of the main degree of carbonation ( $pCO_2$ , D), with a positive tangent of the angle of inclination in the center of the plan, and the content of limestone rock (GL, C) with a negative influence are most strongly influenced. Lines almost parallel to the base show insensitivity to changes in the corresponding factors, which is characteristic of factors B, E in Fig. 1, a.

Table 3 – ES-strength models of material characteristics and their statistical characteristics

R1h, MPa	R 28, MPa	R 180, MPa
R1h = +8.80 +3.70 * A +0.90 * B -0.50 * C +1.30 * D +0.50 * E +0.40 * A * B +0.20 * A * D +0.20 * A * E +0.40 * B * C -0.100 * B * D +0.10 * B * E -0.30 * C * D -0.30 * C * E +0.20 * D * E +0.98 * A2 -0.52 * C2 -0.52 * D2 -0.32 * E2	R28 = +12.69 +5.88 * A +1.12 * B -1.22 * C -0.22 * D +0.12 * E +0.47 * A * B -0.28 * A * C -0.18 * A * D +0.47 * B * C -0.13 * B * D +0.27 * D * E +1.36 * A2 -0.44 * B2 -0.64 * C2 -0.54 * E2	R180 = +13.87 +6.80 * A +1.10 * B -1.30 * C -0.40 * D +0.10 * E +0.30 * A * B -0.50 * A * C -0.20 * A * D -0.30 * A * E +0.30 * B * C +0.30 * B * D +2.13 * A2 -0.97 * B2
R-squared 0.9983 Adj R-squared 0.9960 Preq R-squared 0.9979 Adeq Precision 93.028	R-squared 0.9984 Adj R-squared 0.9967 Preq R-squared 0.9928 Adeq Precision 90.276	R-squared 0.9985 Adj R-squared 0.9973 Preq R-squared 0.9922 Adeq Precision 106.701

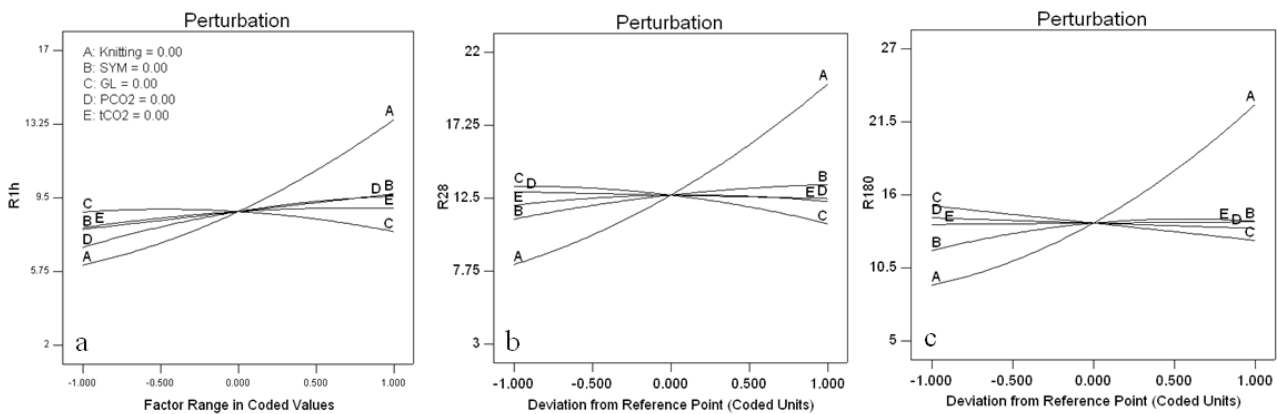
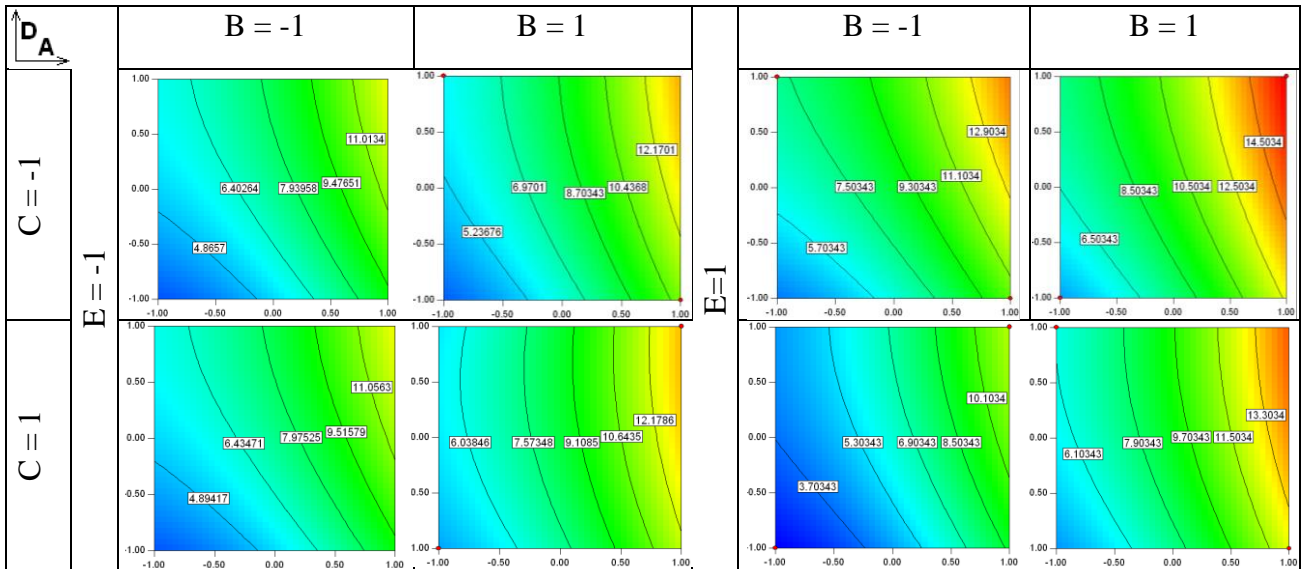


Fig. 1. Diagram of disturbances of strength properties at the central point of the plan:  
 a – for R1h; b – for R28; c – for R180

It is difficult to get a visual representation of the field of material properties directly due to the multidimensionality of the model under consideration. However, an idea of the geometric characteristics of the properties' field can be obtained from a series of line diagrams of the level of the desired property (strength R1h, MPa), in the coordinates of the two main factors A and D at fixed values of factors B, C and E. Given the low sensitivity of the model for the latter properties B, C, E it is convenient to consider the map of isolines at the vertices of the unit cube of the factorial subspace BCE: a total of 8 sections shown in Table 4.

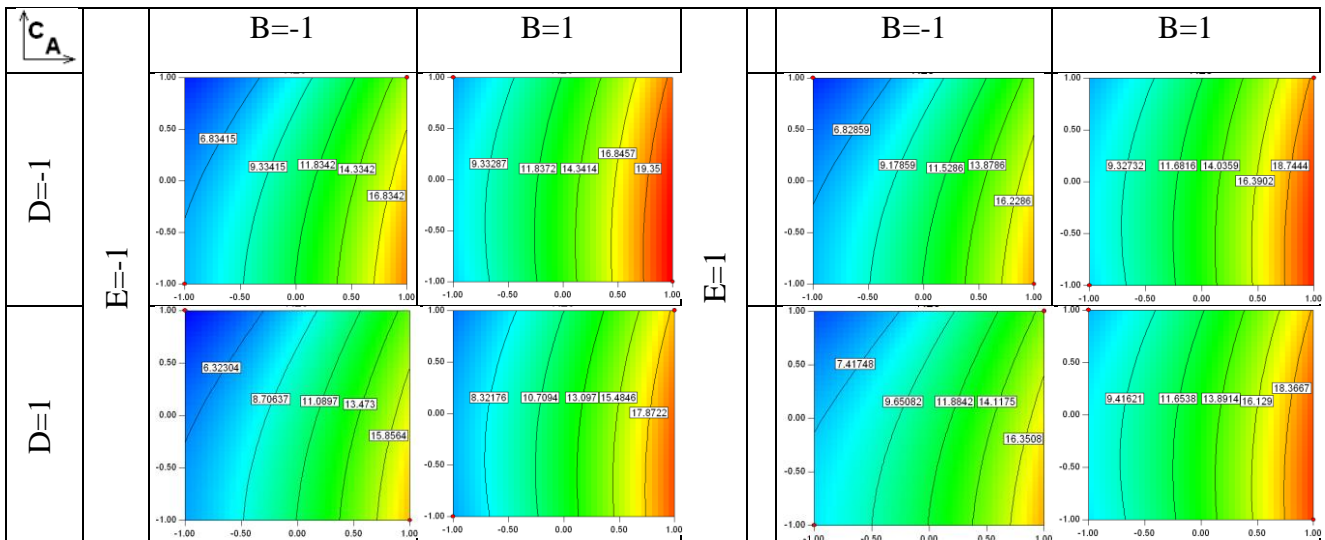
Table 4 – Graphic representation of the strength field of the material at the age of 1 hour from the end of carbonization Rh1, MPa



Since the strength values are actually consecutive elements of the same time series, a single systematic interpretation is appropriate for these data. It is possible only after considering all available results, in analytical and graphical form.

*Compressive strength within 28 days after carbonization.* The perturbation diagram for the considered model is shown in Fig. 1, b. From the diagram in Fig. 1, b shows that the main influencing factor is the consumption of cement (Knitt, A), with a positive tangent of the tangent angle. Next is the limestone content (GL, C) with a negative tangent of the tangent angle. Factors B, D and E are characterized by a smaller influence. Since the graphical presentation of the model is implemented using maps of isolines, as factors corresponding to the axes of the diagram, it is appropriate to choose A and C. Other factors with a relatively small effect on the strength of R28 are presented in discrete form. As for R1h, they correspond to the vertices of the unit cube of the factor subspace BDE. The appearance of the corresponding diagrams is shown in Table 5.

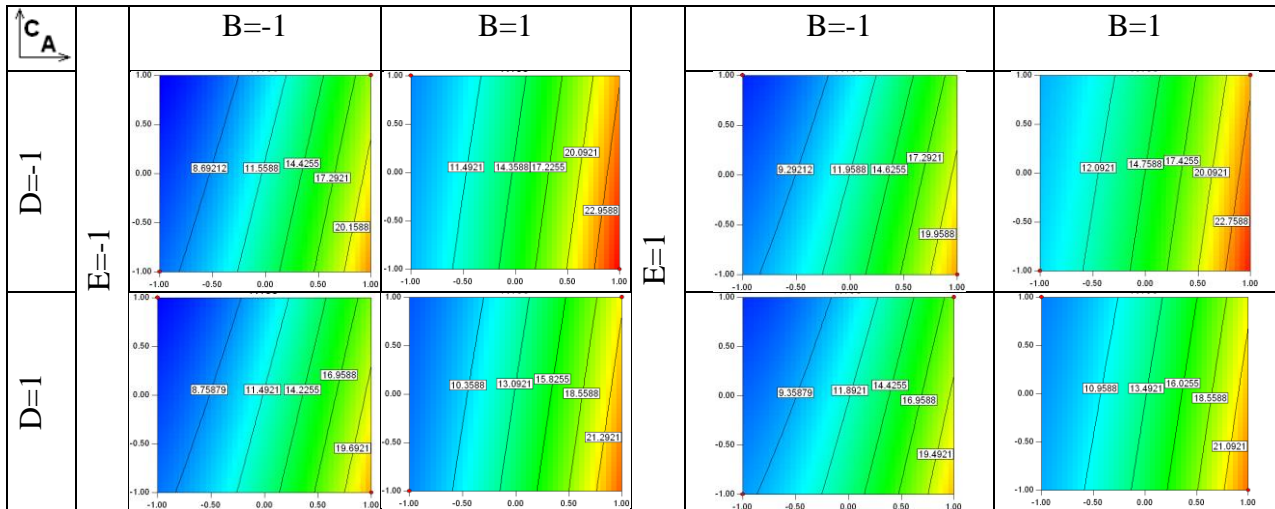
Table 5 – Graphic representation of the strength field of the material at the age of 28 days, after the end of R28 carbonation, MPa



*Compressive strength within 180 days after carbonization.* The perturbation diagram for the considered model is shown in Fig. 1, c. It can be seen from the diagram that the main influencing factor

is again the consumption of cement (Knitt, A), with a positive tangent of the tangent angle. Other factors have a rather weak effect. The dependence for the SYM concentration factor (SYM, B) is characterized by a significant curvature, however, the content of limestones (GL, C) should again be distinguished from the tangent of the angle of inclination, which belongs to the center of the plan with a negative contribution value. Factors B, D and E are presented in discrete form, the axes of the diagrams – A and C. The construction scheme (Table 6) is similar to the previous one, shown in Table 6.

Table 6 – Graphic representation of the strength field of the material at the age of 180 days, after the end of carbonization R180, MPa



*Interpretation of the role of factors in the formation of the strength of characteristics.* The change in the degree of influence of the consumption of binder A by 3.2 MPa 1 hour after carbonization is a consequence of the change in the levels of factors B, D and E. At this age, the maximum increase in the strength of lightweight aggregate concrete is observed at the maximum content of the SYM additive (SYM, B) and the maximum values of parameters characterizing the carbonation regime. In contrast, at the age of 28 and 180 days, the maximum increase in strength occurs with the maximum content of SYM additive, with the use of a binder without ground limestone rock and with minimum values of pressure and carbonation time. The dependence of the strength of carbonized expanded clay concrete on the consumption of the binder is described by a function of the second order. With an increase in the consumption of the binder, the degree of influence of the factor increases. Thus, when the binder consumption is increased from 300 to 400 and from 400 to 500 kg/m<sup>3</sup>, the strength of concrete increases on average by 2.7 and 4.7 MPa one hour after carbonization, by 4.2 and 7.2 MPa at the age of 28 days and at 4.5 and 9.5 MPa at the age of 180 days.

The second most influential prescription factor is the factor (GL, C) – percentage content in binding ground limestone. This factor is ambiguous in terms of its influence. At the age of one hour after carbonation, a change in the nature of exposure causes a change in the content of SYM and the amount of pressure and time of carbonation. Thus, in the absence of SYM additive and at the maximum values of pressure and carbonation time, an increase in the binder content of ground limestone leads to a decrease in strength by 3.0 MPa. With the content of SYM in the amount of 0.4% of the weight of the binder and at the minimum values of pressure and carbonation time, increasing the content of the binder of ground limestone rock from 0 to 30% leads to an increase in strength by 1.0 MPa.

With the increase in the age of concrete, the change in carbonation regimes has practically no effect on the degree and nature of the influence of the content of binding ground limestone on the strength of concrete. In this case, the consumption of the binder and the content of the SYM additive have a significant effect. Thus, with a binder consumption of 500 kg/m<sup>3</sup> and the absence of SYM additive in the concrete mixture, the change in the content of ground limestone in the studied interval leads to a decrease in strength by 4.0 MPa at the age of 28 days and by 4.1 MPa at aged 180 days. With a binder consumption of 300 kg/m<sup>3</sup> and the content of the SYM additive in the amount of

0.4% of the weight of the binder, replacing up to 30% of cement with ground limestone has practically no effect on the strength of concrete at the age of 28 and 180 days after carbonization.

Since the values of strength characteristics studied by modeling are elements of a time series, it is of interest to study the transformation of strength models in the hardening process. It should be noted that all factors (AE) of the constructed regression ES-models affect the strength characteristics due to the material structure. When considering the models presented in Table 4, it is easy to determine the trend in the transformation of the dependences of the strength properties of the material on the studied factors affecting the structure. It basically boils down to the following – when moving from early hardening times to normative ones (28 days) and further up to 180 days, the models are significantly simplified. Thus, in the R180 model, many components are statistically excluded (exclusion is based on the p-value [19]) due to insignificance, partial simplification is evident for R28. Such exclusion reflects objective reality. In connection with these observations, the following hypothesis is of interest. The process of structure formation that occurs during hardening is, especially in the late stages, a process of a relaxation nature, and the amount of free energy associated with the structure of the material (structural potential [21]) approaches its minimum value, at least in some directions. Near the minimum of the structural potential, mainly linear interactions associated with factors directly related to the structure of the material remain significant. Thus, there is a tendency to simplify ES-models of a number of properties that are significantly dependent on the structure, for example, strength characteristics, mainly due to the elimination of interaction components.

The final formulation of the proposed hypothesis is as follows. In experimental-statistical models of structure-dependent properties (for example, strength), during the process of structure formation, there is a tendency to simplify due to the elimination of a number of components, mainly members that describe the interaction of factors that determine the structure of the material.

At the relatively late stages of hardening, stepwise splitting of the components can be observed – if any components of ES-models were split at the previous stages of structure formation, they do not occur in the following stages. This effect is manifested, in particular, for R28 and R180. The described display of the course of structure formation in the form of a stepwise transformation of ES-models corresponds to the concept of the material structure development process and its properties "from what has been achieved" [22].

The proposed hypothesis is preliminary in nature and its verification needs to be investigated by time series data of structurally dependent properties, for example, strength, which is the subject of future research.

*Optimization of material properties by methods of desirability functions.* Since the optimization of the set of recipe-technological factors is carried out in the considered version of ES-modeling according to three types of strength – R1h, R28 and R180, it belongs to the multi-criteria optimization methods based on the idea of compromise solutions.

One of the approaches in the analyzed case is the transition to a single criterion-convolution of partial criteria (1):

$$\Psi(\varphi_1(x_1, \dots, x_m), \varphi_2(x_1, \dots, x_m), \dots, \varphi_n(x_1, \dots, x_m)) \rightarrow \max. \quad (1)$$

The convolution method found an engineering embodiment in the form of desirability functions. It can be viewed as an apparatus for interaction with a decision-maker whose task is to qualitatively determine the degree of importance of partial criteria and the type of function itself using weight indicators for each criterion.

The capabilities of the *Design Expert* package in were used to optimize the composite material, which allow, in particular, carrying out multi-criteria optimization of the research result and the selection of optimal solutions. This method is based on the multiplicative nature of the desirability function D, which is determined by formula (2) [18]:

$$D = \left( d_1^{r_1}, d_2^{r_2}, \dots, d_n^{r_n} \right) \prod_i \frac{1}{r_i}, \quad (2)$$

where  $d_i$  reflect the degree of desirability of each of the partial criteria  $0 \leq d_i \leq 1$ .

When maximizing the target level of  $X_i$  at the selected upper and lower limits of the interval of changes of this factor  $High_i$  and  $Low_i$  correspondingly expressed as (3):

$$d_i = \left[ \frac{X_i - Low_i}{High_i - Low_i} \right]^{wt_i} \quad Low_i < X_i < High_i \quad (3)$$

In the case of minimization of the level  $X_i$ , the corresponding value of desirability is (4):

$$d_i = \left[ \frac{High_i - X_i}{High_i - Low_i} \right]^{wt_i} \quad Low_i < X_i < High_i, \quad (4)$$

where  $wt_i$  – indicator of the "influence" of the desirability function (weight factor), at  $wt_i = 1$ , di-linear function;  $wt_i > 1$  exerts a greater influence on the displacement of  $d_i$  towards the target value;  $wt_i < 1$  – a less important degree of influence.

In the original task, not all criteria are equally important. The degree of importance  $r$  (2) is expressed in the form of integers from 1 ("insignificant criterion") to 5 ("extremely important criterion"). The method discussed above, embodied in the form of a program, represents a convenient and flexible engineering tool for solving the problems of optimizing composites and, in particular, lightweight aggregate concrete of accelerated carbonate hardening.

For the constructed ES-models (Table 3), it is possible to set a large number of optimization tasks that differ in indicators of importance and weight. Let's consider two of them, which have a direct engineering meaning.

*Optimizing the result of long-term hardening.* The obvious goal of creating a composite material is to achieve maximum strength during the entire long-term hardening process of 180 days. But strength in the regulatory control period of 28 days is also important. To achieve appropriate results, other restrictions and requirements (except, of course, fixed interval restrictions) are removed. The appropriate conditions allow us to construct partial optimization criteria and determine the distribution of degrees of importance for the desirability function (Table 7).

Table 7 – Parameters of the desirability function for optimization of long-term hardening

Factors and properties	Objectives	Lower limit	Upper border	Lower weight	Upper weight	Importance
Knitt	in the interval	-1	1	1	1	1
SYM	in the interval	-1	1	1	1	1
GL	in the interval	-1	1	1	1	1
PCO <sub>2</sub>	in the interval	-1	1	1	1	1
tCO <sub>2</sub>	in the interval	-1	1	1	1	1
R1h	maximum	2.1	16.5	1	1	2
R28	maximum	3.8	21.8	1	1	2
R180	maximum	5.9	26.1	1	1	5

The desirability function as a convolution criterion was optimized, and the following solutions were obtained in coded values (Table 8).

Table 8 – Results of optimization of long-term hardening

No	Knitt	SYM	GL	PCO <sub>2</sub>	tCO <sub>2</sub>	R1h	R28	R180	Desirability
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0.89</b>	<b>-1</b>	<b>0.08</b>	<b>0.52</b>	<b>14.8 8</b>	<b>21.2 1</b>	<b>24.6 3</b>	<b>0.926811</b>
2	1	0.93	-0.99	0.06	0.51	14.87	21,23	24.60	0.926516
3	1	0.99	-0.98	0	0.54	14.84	21.25	24.60	0.926229
4	1	0.98	-1	-0.17	0.23	14.25	21.48	24.84	0.925759

The first of them is the most profitable, it should be accepted. It is displayed graphically in the form of arc diagrams (Fig. 2).

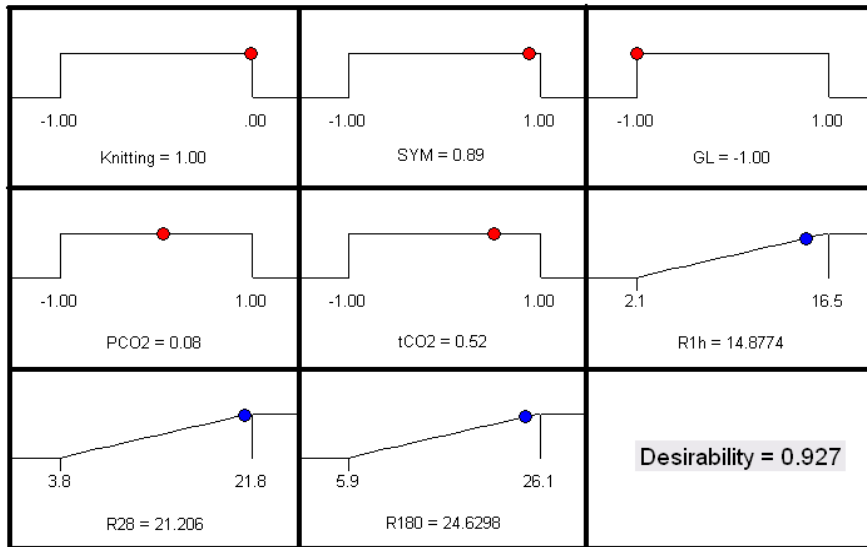


Fig. 2. The main result of multi-criteria optimization of long-term hardening

*Optimization of the composition of the composite material taking into account additional conditions.* Such additional conditions are the saving of the binder – cement, as well as technological conditions of low pressure and short carbonation time (this corresponds to safety conditions and reduction of construction costs for the carbonization chamber). Normative characteristics of the material at the 28-day hardening period are also important. But the main goal is still long-term strength. The formulated optimization problem allows you to construct partial optimization criteria and determine the distribution of degrees of importance for the desirability function (Table 9).

Table 9 – Parameters of the desirability function for optimization of long-term hardening

Factors and properties	Objectives	Lower border	Upper border	Lower weight	Upper weight	Importance
Knitt	in the interval	-1	1	1	1	4
SYM	in the interval	-1	1	1	1	3
GL	in the interval	-1	1	1	1	3
PCO <sub>2</sub>	in the interval	-1	1	1	1	2
tCO <sub>2</sub>	in the interval	-1	1	1	1	2
R1h	maximum	2.1	16.5	1	1	4
R28	maximum	3.8	21.8	1	1	5
R180	maximum	5.9	26.1	1	1	5

The desirability function was optimized, and the following solutions were obtained in coded values (Table 10).

Table 10 – Results of optimization of long-term hardening

No	Knitt	SYM	GL	PCO <sub>2</sub>	tCO <sub>2</sub>	R1h	R28	R180	Desirability
<b>1</b>	<b>0.57</b>	<b>1</b>	<b>-0.49</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>9.29</b>	<b>17.89</b>	<b>20.23</b>	<b>0.583693</b>
2	0.57	1	-0.48	-1	-1	9.32	17.91	20.24	0.58369 1
3	0.57	1	-0.48	-1	-0.98	9.33	17.91	20.2 3	0.583678
4	0.57	1	-0.52	-1	-1	9.28	17.92	20.29	0.583666

The first of them is the most profitable, it should be accepted. It is displayed graphically in the form of arc diagrams (Fig. 3).

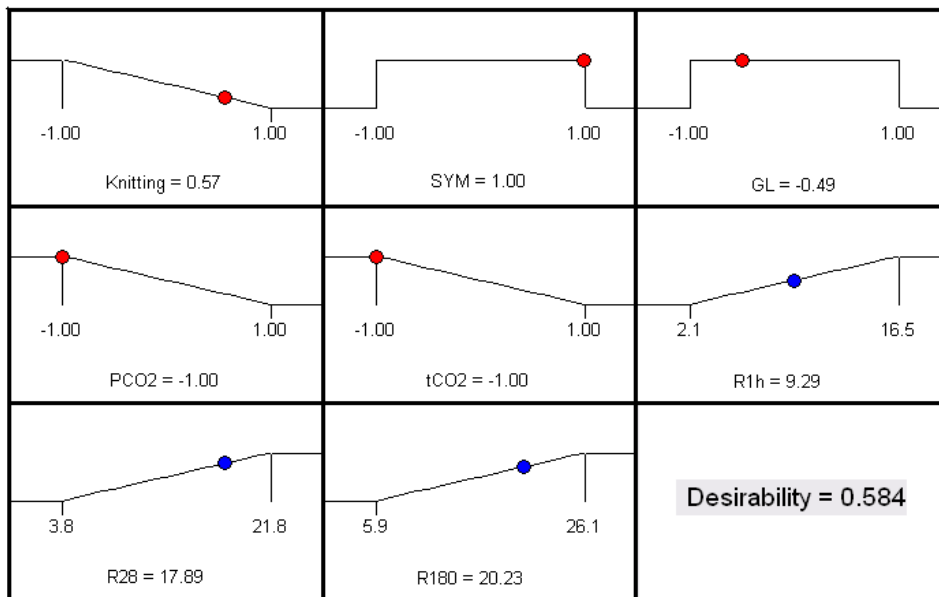


Fig. 3. The main result of multi-criteria optimization of long-term hardening in the presence of additional conditions and requirements

As can be seen from the comparison of the results in Tables 8 and 10, the imposition of additional conditions made it possible to facilitate the carbonation regime and save part of the cement, at the cost of losing 6 MPa of long-term strength. A significant decrease in the values of the desirability function in Table 10 indicates the significant impact of new requirements and restrictions, as well as the conditions of a hard compromise of partial criteria.

The determined optimal modes indicate the possibility of optimization under significant restrictions, which demonstrates flexibility in the application of the apparatus of the desirability function. The approach to quantitative optimization, which is based on the desirability function, is especially useful in those cases when the large dimension of the original problem does not allow to visually display the factor space, as well as when the interpretation of individual features of ES-models is difficult. These useful properties are fully manifested in the optimization of the recipe and technological factors for the production of expanded clay concrete of accelerated carbonization hardening.

**Conclusions.** The study of the strength data of expanded clay concrete of carbonization hardening made it possible to build ES-models of the strength characteristics of the material. The experimental strength values range from 2.1 to 16.5 MPa 1 hour after carbonization, from 4.6 to 21.8 MPa at the age of 28 days, and from 5.9 to 26.1 MPa at the age of 180 days. Models are graphically displayed and interpreted. The proposed hypothesis is that in experimental-statistical models of structure-dependent properties (for example, strength), during the process of structure formation, there is a tendency to simplify due to the elimination of a number of components, mainly members that describe the interaction of factors that determine the structure of the material. In particular, there is a gradual elimination of the constituent ES-models of the properties related to the material's structure. The formulation of two optimization problems of a set of recipe-technological factors based on long-term strength is proposed. The first optimization task concerns long-term strength in the absence of significant additional requirements and restrictions. The second task is loaded with additional requirements to reduce cement consumption and facilitate carbonation technology. In connection with the defined tasks, the parameters of the desirability function were determined, optimization was carried out and optimal sets of recipe-technological factors were obtained. So, for the second task, the composition and set of properties was as follows: Knitt = 0.57, SYM = 1, GL = -0.49, PCO<sub>2</sub> = -1, R1h = 9.29 MPa, R28 = 17.89 MPa, R180 = 20.23 MPa. The imposition of

additional requirements made it possible to save cement consumption and improve the indicators of the carbonization technological regimes at the cost of reducing the long-term strength by approximately 6 MPa.

### Reference

- [1] S. Teir, S. Eloneva, R. Zevenhoven, "Production of precipitated calcium carbonate from calcium silicates and carbon dioxide", *Energy Convers Manage*, vol. 46, pp. 2954–2979, 2005.
- [2] G. Groves, D. Rodway, I. Richardson, "The carbonation of hardened cement pastes", *Advances in Cement Research*, vol. 3(11), pp. 117-25, 1990.
- [3] S. Kashef-Haghighi, S. Ghoshal, "Physico-Chemical Processes Limiting CO<sub>2</sub> Uptake in Concrete during Accelerated Carbonation Curing", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 52 (16), pp. 5529-5537, 2013.
- [4] D. Suescum-Morales, K. Kalinowska-Wichrowska, J.M. Fernández, J.R. Jiménez, "Accelerated carbonation of fresh cement-based products containing recycled masonry aggregates for CO<sub>2</sub> sequestration", *J CO<sub>2</sub>Util*, vol. 46, 101461, 2021.
- [5] O.A. Gara, "Osoblyvosti karbonizatsiynoho tverdinnya keramzytobetonu", *Visnyk ODABA*, vol. 62, pp. 22-27, 2016.
- [6] V. Rostami, Y. Shao, A.J. Boyd, Z. He, "Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing", *CemConcr Res*, vol. 42(1), pp. 186–193, 2012.
- [7] B. Lagerblad, *Carbon dioxide uptake during concrete life cycle-state of the art*. Swedish Cem.Concr. Res. Inst., 2005.
- [8] A. Junior, R. Filho, E. Fairbairn, J. Dweck, "A study of the carbonation profile of cement pastes by thermogravimetry and its effect on the compressive strength", *J Therm Anal Calorim*, vol. 116, pp. 69–76, 2014.
- [9] B. Šavija, M. Luković, "Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities", *Construction and Building Materials*, vol. 117, pp. 285-301, 2016.
- [10] L. Parrott, "Carbonation, moisture and empty pores", *Advances in Cement Research*, vol. 4(15), pp. 111-118, 1992.
- [11] C. Shi, Z. Tu, M.Z. Guo, D. Wang, "Accelerated carbonation as a fast curing technology for concrete blocks", *Sustain. Nonconv. Constr. Mater. Using Inorg. Bond. Fiber Compos.*, WoodheadPublishing, pp. 313-341, 2017.
- [12] M. Thiery, G. Villain, P. Dangla, G. Platret, "Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: effects of the chemical kinetics", *Cement and concrete research*, vol. 37(7), pp. 1047-1058, 2007.
- [13] A. Morandau, M. Thiery, P. Dangla, "Investigation of the Carbonation Mechanism of CH and C-S-H in Terms of Kinetics, Microstructure Changes and Moisture Properties", *Cement Concrete Res.*, vol. 56, pp. 153-170, 2014.
- [14] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli, R.B. Polder, *Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair*. John Wiley & Sons, 2013.
- [15] J. Matthews, *Carbonation of ten years old concretes with and without PFA*. ProcAshTech, 1984.
- [16] L. Barcelo, J. Kline, G. Walenta et al, "Cement and carbonemissions", *Mater. Struct*, vol. 47(6), pp. 1055–1065, 2014.
- [17] V.A. Voznesenskiy, T.V. Lyashenko, *ES-modeli v komp'yuternom stroitel'nom materialovedenii*. Astroprint, 2006.
- [18] R.H. Myers, D.C. Montgomery, C.M. Anderson-Cook, *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons, 2009.
- [19] F. Grant, *Design Expert 7.1*. Scientific Computing World, 2007.
- [20] A.A. Gara, *Razrobotka karbonizatsionnoy tekhnologii keramzitobetonnykh stenovykh izdeliy*, dis.... k.t.n.: 05.23.05. Odesskiy inzhenerno-stroitel'nyy institute. Odessa, 1990.
- [21] A.V. Kolesnykov, S.V. Semenova, O.O. Makovets'ka, "Modelyuvannya protsesiv

strukturoutvorennya kompozytiv metodamy teorii katastrof", *Suchasne budivnytstvo ta arkhitektura*, vol. 6, pp. 90-98, 2023.

- [22] V.N. Vyrovoy, V.H. Sukhanov, O.A. Korobko, *Struktura materyala v structure konstruksyy*. Polyhraf, 2016.
- [23] I. G. Grankovskiy, *Strukturoobrazovaniye v mineral'nykh v'yazhuchikh sistemakh*. Nauk. dumka, 1984.
- [24] Ye.S. Shinkevich, *Razrabotka nauchnykh osnov polucheniya izvestkovo-kremnezemistykh stroitel'nykh kompozitov neavtoklavnoho tverdeniya* : diss...dokt. tekhn. nauk., OGASA. 2008.

## ОПТИМІЗАЦІЯ ЕФЕКТИВ ПРІСКОРЕНОГО КАРБОНІЗАЦІЙНОГО ТВЕРДНЕННЯ КЕРАМЗИТОБЕТОНУ

<sup>1</sup>Гара О.А., к.т.н., доцент,

gara@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2413-1860

<sup>1</sup>Колесников А.В., к.т.н., доцент,

kolesnikov\_himek@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8737-0933

<sup>1</sup>Семенова С.В., к.т.н., доцент,

semenova@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5309-5854

<sup>1</sup>Олійник Т.П., к.т.н., доцент,

oleynik\_himek@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4469-6797

<sup>1</sup>Одеська державна академія будівництва та архітектури  
4, вул. Дідріхсона, Одеса, 65029, Україна

**Анотація.** У роботі досліджуються дані, одержані при дослідженні прискореного карбонізаційного тверднення керамзитобетону. Розглядається механізми та методика здійснення карбонізаційного тверднення, вплив на міцнісні характеристики рецептурних та технологічних факторів. Найбільш значущими з них були витрата в'язучого, відносна кількість і гранулометрія наповнювача (змеленого вапняку) та заповнювача (керамзиту), концентрація пластифікуючої добавки (СДБ) та технологічні параметри карбонізації – максимальний тиск та час карбонізації. Розглядається природа впливу відповідних властивостей на міцнісні характеристики. Досліджувалися результати спланованого та здійсненого експерименту за допомогою методології поверхонь відгуку. Будувалися експериментально-статистичні моделі міцності при стиску на строках 1 година, 28 діб та 180 діб від кінця процедури карбонізації. Визначені ступені впливу різних чинників. Побудовані залежності відображалися за допомогою серії діаграм ізоліній міцності при граничних значеннях трьох факторів слабкого впливу. Запропонована гіпотеза, згідно з якою в експериментально-статистичних моделях властивостей матеріалів, тісно зв'язаних з їхньою структурою, створюється тенденція до спрощення під час проходження відповідними матеріалами стадії структуроутворення. Зникають складові, переважно пов'язані з взаємодією факторів, визначаючих структуру матеріалу. Відповідні трансформації виникають, зокрема, для побудованих моделей міцності. Сформульовані два завдання оптимізації довгострокової міцності керамзитобетону. Перша задача пов'язана з усуненням жорстких додаткових обмежень при оптимізації, при цьому довгострокова міцність досягає свого максимуму. Друге інженерно обґрунтоване завдання, містить додаткові вимоги економного витрачання в'язучого та зручності технологічного режиму карбонізації. Для обох завдань були визначені розподіли параметрів функції бажаності. В результаті проведеної оптимізації одержані два основних набори рецептурно-технологічних факторів і відповідних властивостей композиційних матеріалів.

**Ключові слова:** прискорене карбонізаційне тверднення, планування експерименту, оптимальність за комбінованим критерієм, функція бажаності.

Стаття надійшла до редакції 24.05.2024

**COMPARISON OF THE EFFECTIVENESS OF SUPERPLASTICIZERS  
IN CONCRETES FOR RIGID PAVEMENT**

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

<sup>1</sup>**Finohenov O.I.**

finogenov@ogasa.org.ua, ORCID: 0009-0005-3631-4786

<sup>1</sup>*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
4, Didrichson street, Odessa, 65029, Ukraine

**Abstract.** More and more roads with hard cement concrete pavements are built in developed countries, including Ukraine. The production of almost all types of concrete involves the use of plasticisers. Today, polycarboxylate additives are the most effective plasticisers. However, the effect of water-reducing modifiers depends on the formulation and technological characteristics of a concrete. In the construction of hard pavements, concrete mixes with relatively low mobility are used, in which it is necessary to determine the effectiveness of various plasticisers, taking into account the type of cement. Accordingly, the purpose of the study is to establish how the strength of concrete pavements is determined by different types of plasticisers.

The strength of concretes with four different plasticisers was compared. The plasticisers considered were: Polyplast SP-1 (based on a mixture of sodium salts and polyethylene of phthalate sulphuric acids); Coral ExpertSuid-5 (based on carboxylic acid polymers and esters), Coral MasterSilk (based on lignosulphonates), and Sika® Plastiment®-1230 (produced on the basis of lignosulphonates). These were added in two dosages – 0.8 and 1.2% by weight of cement. The cement used was PC II/A-Sh-500 R-H in the amount of 350 kg/m<sup>3</sup>, the crushed stone was as fine as 5–20 mm, and the washed quartz sand had the fineness modulus 2.4.

The mobility of all concrete mixes was S1 and depended on the composition of the concrete. It has been found that the use of Coral ExpertSuid-5 can reduce the water/cement ratio most significantly. The use of Coral MasterSilk reduces the water/cement ratio to a slightly lesser extent. SP-1 and Sika® Plastiment®-1230 have approximately the same, and the lowest, effectiveness in reducing the water demand of the mixture.

At the design age, the highest strength (55.9-57.5 MPa) was observed in concrete pavements modified with Coral ExpertSuid-5 and Sika® Plastiment®-1230 plasticisers. At the age of 3 days, concretes with the Coral ExpertSuid-5 additive have the highest strength. An increase in the dosage of these two plasticisers from 0.8% to 1.2% increases the early strength of concrete, but does not change the strength at the design age. The strength of the concrete modified with the Polyplast SP-1 and Coral MasterSilk additives was lower at the early and design ages. That is, taking into account the use of mixtures of low mobility and cement PC II/A-S-500 R-H, the effectiveness of the additive based on carboxylic acid polymers in increasing the strength of concrete at the design age is approximately equal to that of the lignosulphonate-based additive.

**Keywords:** rigid pavement, superplasticiser, effectiveness, concrete, strength.

**Introduction.** Roads with rigid cement concrete pavements are widely used in developed countries. In recent years, the share of roads with cement concrete pavements has also increased significantly in Ukraine, due to their technical advantages. The main ones are their high durability, resistance to formation of corrugations and ruts, and low dependence of their performance on the ambient temperature. An important economic advantage of hard-surfaced roads for Ukraine is that the production of cement concrete does not use bitumen, which otherwise must be exported. Accordingly, in the process of post-war reconstruction of the country, the construction of cement concrete roads will also be highly practical economically.

In recent decades, plasticisers of one kind or another have been used to produce almost all types of concrete. At the current stage of development of the construction industry, polycarboxylate superplasticisers are the most effective, especially in the manufacture of concrete mixes with high mobility. However, it is concrete mixes with relatively low mobility that are used in the construction of rigid concrete pavements. Besides, new plasticisers and complex additives never stop appearing on the domestic market. Therefore, selecting rational superplasticisers for hard pavement concretes is a topical task. To solve it, one should also take into account the type of cement used.

**Analysis of research and publications.** Cement concrete can effectively distribute the stresses that loading produces on the road base, and withstands repeated loading better than asphalt concrete does. So, rigid pavements prove the most effective with high traffic intensity [1].

It is economically practical to use rigid pavements, primarily because roads with such pavements are two or more times as durable as those with asphalt concrete pavements [2].

Due to its lighter colour, cement concrete has better surface visibility, which increases traffic safety in the dark. Also, the properties of hard pavements hardly change with fluctuations in the ambient temperature [3].

When laying rigid pavements, a project must specify the requirements for concrete, primarily the tensile strength class, compressive strength class, and frost resistance. DBN B.2.3-4:2015 specifies, depending on the road category, the minimum design class of concrete for cement concrete pavements [4].

Today, virtually all concrete is produced using plasticising additives (most often superplasticisers), because it is necessary to ensure the specified strength and frost resistance of the material while minimising production costs [5]. The most effective superplasticisers on the market are polycarboxylate additives [6–9]. For example, the study [6] shows that the use of polycarboxylates doubled the strength of concrete, as compared with unmodified concrete, and amounted to more than 60 MPa. When lignosulphonate superplasticisers were used, the strength was more than 45 MPa, and with naphthalene sulphomaldehyde superplasticisers, it was about 40 MPa. In the paper [9], it is shown that cement stone with a polycarboxylate additive has a higher compressive strength than cement stone containing naphthalene-based superplasticisers. However, the effect of water-reducing modifiers depends on the formulation and technological characteristics of the concrete. Particular attention should be paid to the compatibility of the type of cement and the superplasticiser [10]. For example, it is known that polycarboxylate-based plasticisers have better water reduction in high-mobility concrete mixes. So, when using low-mobility or stiff mixes, the effectiveness of plasticisers must be additionally determined.

When using a slipform paver for pavement construction, which is the most common technology, in accordance with the requirements of DBN B.2.3-4:2015 [4], the concrete mix should have a cone slump of 1 to 5 cm, depending on the speed of the paver. That is, the mixtures have low mobility, and determining the effectiveness of plasticisers of various types in these mixtures is a task of current importance. The optimal consumption of plasticiser can only be determined in the laboratory, taking into account the characteristics of the aggregates and cement used [5].

**The purpose of the study** is to establish how plasticisers of different types determine the strength of concrete in rigid pavements.

**Materials and methods.** The experiment compared the strength of concrete with four different plasticisers available on the domestic market:

- Polyplast SP-1 (company Polyplast, Novomoskovsk). The additive is made on the basis of a mixture of sodium salts of polyethylene of phthalate sulphonic acids of different molecular weights;
- Coral ExpertSuid-5 (company Coral, Zaporizhzhia). It is produced on the basis of polymers of carboxylic acids and esters [11];
- Coral MasterSilk (company Coral, Zaporizhzhia). It is produced on the basis of lignosulphonates [12];
- Sika® Plastiment®-1230 (Sika, Switzerland). Is also produced on the basis of lignosulphonates [13].

The cement used was PC II/A-Sh-500 R-H manufactured by Dickerhoff Cement Ukraine. The amount of cement in all concretes was 350 kg/m<sup>3</sup>. Crushed stone as fine as 5–20 mm and washed quartz sand with the fineness modulus 2.4 were also used.

All additives were introduced in two dosages – 0.8 and 1.2% by weight of cement. Thus, 8 concrete compositions were investigated (Table 1). The workability of all concrete mixes was S1 with a cone slump of 2 to 3 cm. This meets the requirements of DBN B.2.3-4:2015 *Highways*, according to which, as shown above, the mobility of concrete mixes for pavement construction should be 1 to 5 cm [4]. The equal mobility was achieved by selecting the amount of water, along with a corresponding adjustment of the concrete composition.

Table 1 – Compositions of the concretes analysed

№ points	Concrete composition (k/m <sup>3</sup> )					
	Portland - cement	Crushed stone	Sand	Additive		Water
				type	quantity	
1a	350	1205	766	SP-1	2.8 (0.8%)	145
1b			770		4.2 (1.2%)	140
2a			779	Coral ExpertSuid-5	2.8 (0.8%)	128
2b			780		4.2 (1.2%)	127
3a			770	Coral Master Silk	2.8 (0.8%)	139
3b			774		4.2 (1.2%)	134
4a			766	Sika® Plastiment®-1230	2.8 (0.8%)	145
4b			765		4.2 (1.2%)	146

**Research results.** Since the mobility of all the concrete mixes studied was equal, the amount of water in them and, accordingly, the water/cement ratio depended on the composition, i.e., based on the experimental conditions, on the type and amount of a plasticising additive (Table 2).

The data in Table 2 have allowed building the diagram shown in Fig. 1. It visualises the effect of plasticisers on the water/cement ratio of the concrete mixes.

Table 2 – Water/cement ratio of concrete mixes and compressive strength of the concretes analysed

Points	Additive	W/C	Compressive strength, MPa	
			at the age of 3 days	at the age of 28 days
1a	SP-1 (0,8%)	0,414	13,5	1a
1b	SP-1 (1,2%)	0,400	14,5	1b
2a	Coral ExpertSuid-5 (0,8%)	0,366	16,9	2a
2b	Coral ExpertSuid-5 (1,2%)	0,363	17,6	2b
3a	Coral MasterSilk (0,8%)	0,397	13,7	3a
3b	Coral MasterSilk (1,2%)	0,383	14,7	3b
4a	Sika® Plastiment®-1230 (0,8%)	0,414	12,8	4a
4b	Sika® Plastiment®-1230 (1,2%)	0,417	13,6	4b

As can be seen from the diagram in Fig. 1, the water/cement ratio of a mix of the equal mobility S1 is most reduced when using the polycarboxylate additive Coral ExpertSuid-5. The use of the Coral MasterSilk additive reduces the water/cement ratio to a slightly lesser extent. The additives SP-1 and Sika® Plastiment®-1230 are about equally effective in reducing the water consumption of the mix, but are the least effective of the plasticisers considered in the study.

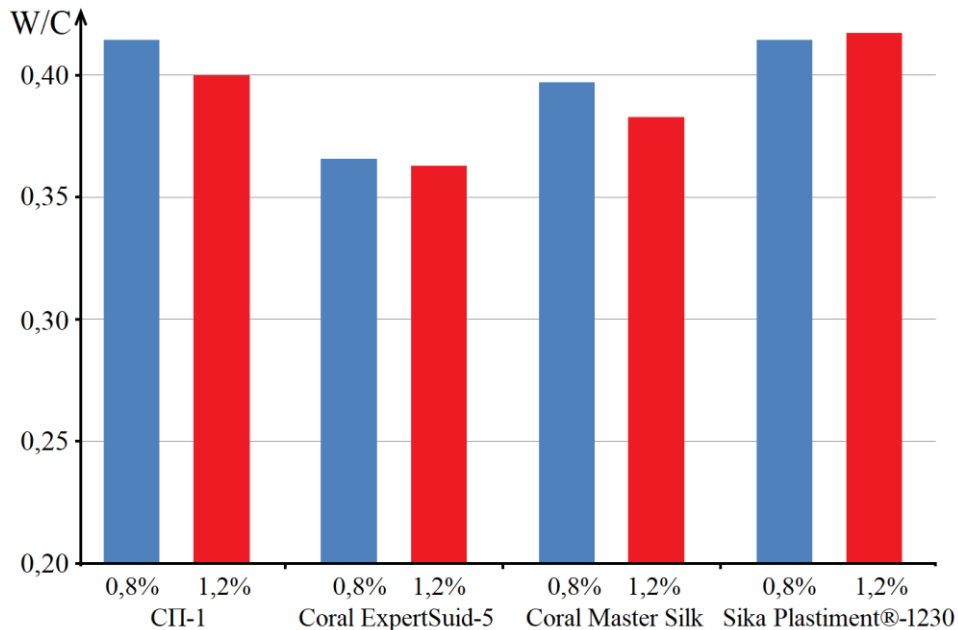


Fig. 1. Effect of the type and amount of a plasticiser on the water/cement ratio of concrete mixes

With an increase in the dosage of the plasticisers SP-1, Coral ExpertSuid-5, and Coral MasterSilk from 0.8% to 1.2% by weight of cement, the water/cement ratio of the mixtures decreases still more. However, when using the lignosulphonate-based additive Sika® Plastiment®-1230, changing its dosage from 0.8% to 1.2% does not affect the water/cement ratio of a mixture.

The compressive strength of concrete was tested at the age of 3 and 28 days (Table 2). The diagrams based on the data in Table 2 and presented in Fig. 2 show how the type and amount of a plasticiser affect the strength.

Analysis of the data in Table 2 and the diagrams shows that at both the early age and the design age of 28 days, the highest strength is that of the concretes modified with the additive based on carboxylic acid polymers Coral ExpertSuid-5. At the age of 3 days, concretes modified with SP-1 and Coral MasterSilk are about equally strong. Concretes with Sika® Plastiment®-1230, which are the highest in their water/cement ratio among the tested ones, have the early strength lower by 0.7–1.1 MPa, as compared with the concretes modified with SP-1 and Coral MasterSilk.

However, at the design age of 28 days, the strength of concretes with Sika® Plastiment®-1230 is by 2.5–4.7 MPa higher than that of concretes with SP-1 and Coral MasterSilk, and only by 0.7–1.6 MPa lower than that of concretes modified with Coral ExpertSuid-5.

At the age of 3 days, with an increase in the dosage of all additives from 0.8 to 1.2% by weight of cement, the strength of concrete increases by 0.7–1 MPa. At the age of 28 days, an increase in the amount of the additive based on carboxylic acid polymers Coral ExpertSuid-5 results in no increase in the concrete strength. For other plasticisers, increasing their dosage to 1.2% causes an increase in the concrete strength by 0.4–2.1 MPa.

This effect of plasticisers on the strength is primarily due to their effect on the water demand and, accordingly, the water/cement ratio of concrete mixes. Fig. 3 shows diagrams that visualise how a water/cement ratio of a mix affects the strength of concrete at the age of 3 and 28 days.

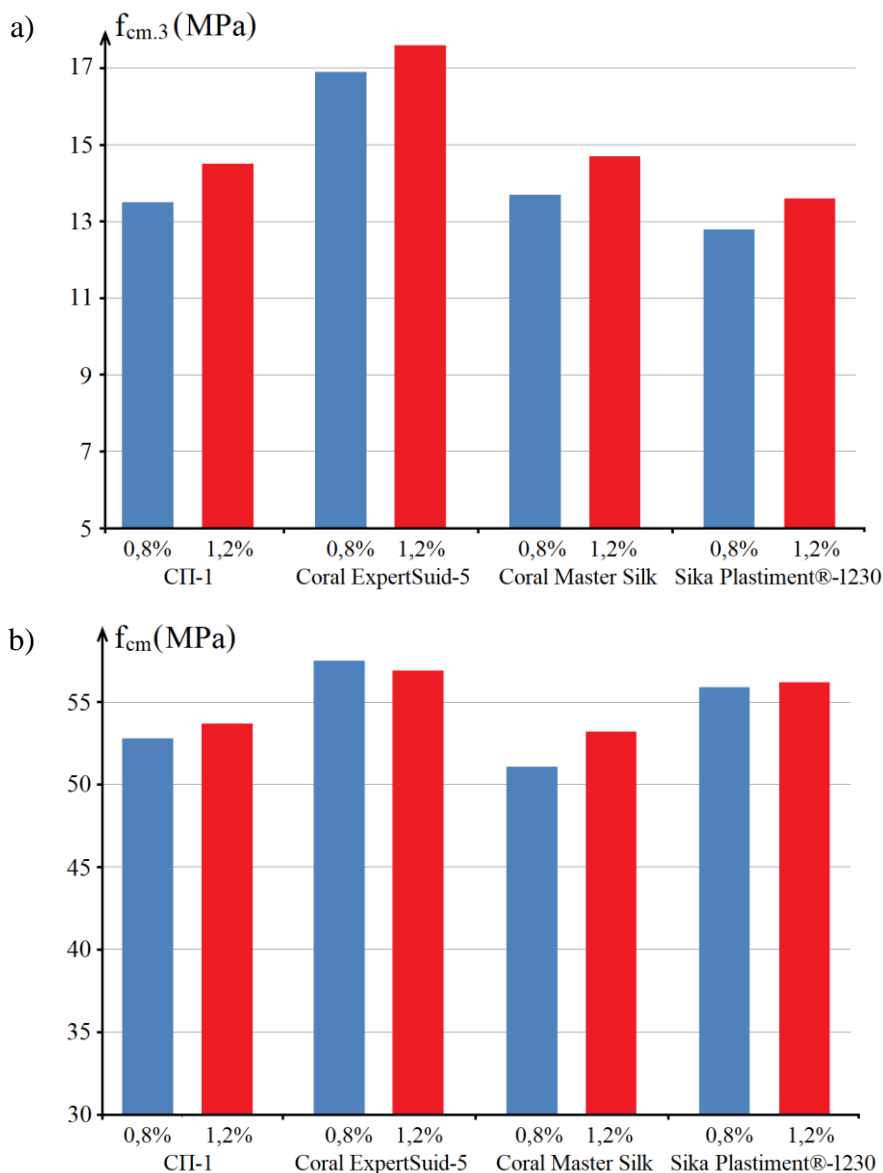


Fig. 2. Effect of the type and amount of a plasticiser on the compressive strength of concretes: a – at the age of 3 days; b – at the age of 28 days

It is known that the effect of the water/cement ratio on the concrete strength is close to a linear relationship [5]. Analysis of the diagrams in Fig. 3 shows that the water/cement ratio of a mix has a more pronounced effect on the strength of concrete at the age of 3 days. The correlation coefficient  $r(W/C, f_{cm,3})$  is 0.94. At the design age, the effect of the water/cement ratio on the strength is not as obvious, with  $r(W/C, f_{cm}) = 0.46$ . This can be explained by the fact that as the age of concrete increases, its strength is increasingly influenced by the peculiarities of the capillary-porous structure, as well as by the structure density and total porosity.

**Conclusions and prospects for further research.** At the design age, the highest strength was observed in the hard pavement concretes modified with Coral ExpertSuid-5 (based on carboxylic acid polymers and esters) and Sika® Plastiment®-1230 (based on lignosulphonates). At the early age, the concretes containing Coral ExpertSuid-5 had the highest strength. An increase in the dosage of these two plasticisers from 0.8% to 1.2% by weight of cement increased the early strength of concrete, but did not cause significant changes in the strength at the design age. Thus, taking into account the use of low mobility mixes typical of hard pavement concretes, as well as PC II/A-S-500 R-H cement, the effectiveness of the carboxylic acid polymer-based additive is approximately the same as that of the lignosulphonate-based additive. However, as noted above, this conclusion is only applicable to the concrete strength at the design age.

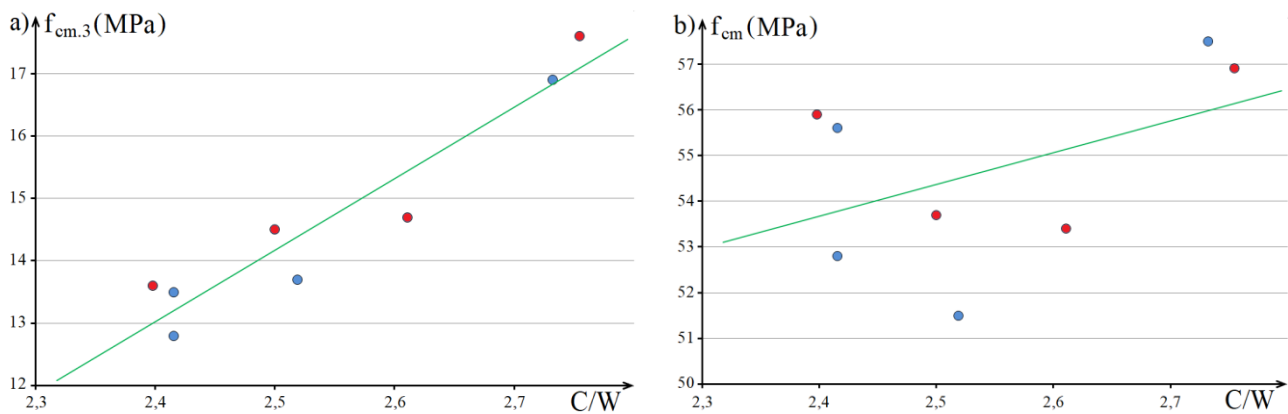


Fig. 3. Effect of the W/C ratio of mixes with equal mobility on the compressive strength of concretes:

a – at the age of 3 days; b – at the age of 28 days

In the future, it is planned to study how plasticisers of the same type affect the complex of properties of concretes and fibre-reinforced concretes, in particular their frost resistance and wear resistance, which are the parameters that determine the durability of rigid pavements. Experimental design methods will be used in the study.

### References

- [1] V.M. Nahaychuk, B.S. Radovs'kyy, "Svitovyy dosvid ta suchasni pidkhody do vykorystannya tsementobetonnoho pokryttya", *Dorohy i mosty*, 21, pp. 188-200, 2020. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.188>.
- [2] V.V. St'ozhka, "Pidvyshchennya dovhovichnosti tsementobetonnoho pokryttya dorih za rakhunok zastosuvannya hidrofobnykh khimichnykh dobavok", *Dorohy i mosty*, 22, pp. 128-137, 2020. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.128>.
- [3] V.V. St'ozhka, P.P. Borkovs'kyy, "Pidvyshchennya dovhovichnosti tsementobetonu dlya pokryttya avtomobil'nykh dorih", *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky»*, 1 (46), pp. 324-332, 2020. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2020-1-46-324-332>.
- [4] DBN V.2.3-4:2015. Avtomobil'ni dorohy. Sporudy transportu. Chastyna I. Proektuvannya. Chastyna II. Budivnytstvo. Kyiv, 2015.
- [5] L.Y. Dvorkin, *Teoretychni osnovy budivel'noho materialoznavstva*. Karavela, 2023.
- [6] L. Dvorkin, V. Zhitkovsky, R. Makarenko, Y. Ribakov, "The Influence of Polymer Superplasticizers on Properties of High-Strength Concrete Based on Low-Clinker Slag Portland Cement", *Materials*, 16, 2075, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16052075>.
- [7] U. Pott, C. Jakob, D. Jansen, J. Neubauer, D. Stephan, "Investigation of the Incompatibilities of Cement and Superplasticizers and Their Influence on the Rheological Behavior", *Materials*, 13, 977, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13040977>.
- [8] Ž. Kos, S. Kroviakov, A. Mishutin, A. Poltorapavlov, "An Experimental Study on the Properties of Concrete and Fiber-Reinforced Concrete in Rigid Pavements", *Materials*, 16, 5886, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16175886>.
- [9] W. Xun, C. Wu, J. Li, C. Yang, X. Leng, D. Xin, Y. Li, "Effect of Functional Polycarboxylic Acid Superplasticizers on Mechanical and Rheological Properties of Cement Paste and Mortar", *Applied Science*, 10 (16), 5418, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10165418>.
- [10] M.M. Alonso, M. Palacios, F. Puertas, "Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes", *Cement and Concrete Composites*, 35(1), pp. 151-162, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.020>.

- [11] Information about the Coral ExpertSuid-5 additive from the official site of the Coral company. [Online]. Available: <http://coral.ua/coral-expertsuid-5/>. Accessed on: May 4, 2024.
- [12] Information about the Coral MasterSilk additive from the official site of the Coral company. [Online]. Available: <http://coral.ua/coral-mastersilk/>. Accessed on: May 4, 2024.
- [13] Information about the Sika® Plastiment®-1230 additive from the official website of the Sika company. [Online]. Available: <https://ukr.sika.com/dms/getdocument.get/e636e3be-2328-4ab7-9723-2ad2b4bb76ef/SikaPlastiment-1230.pdf>. Accessed on: May 4, 2024.

## ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУПЕРПЛАСТИФІКАТОРІВ В БЕТОНАХ ЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ

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

<sup>1</sup>Фіногенов О.І.  
finogenov@ogasa.org.ua, ORCID: 0009-0005-3631-4786  
<sup>1</sup>Одеська державна академія будівництва та архітектури  
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

**Анотація.** Дороги з жорсткими цементобетонними покриттями все частіше будуються в розвинених країнах світу, зокрема в Україні. При виробництві майже всіх типів бетонів використовуються добавки пластифікатори. На сьогодні найбільш ефективними серед пластифікаторів є добавки полікарбоксилатного типу. Проте вплив водоредуруючих модифікаторів залежить від рецептурно-технологічних особливостей бетону. При влаштуванні жорстких покриттів використовуються бетонні суміші з відносно низькою рухомістю, в яких необхідно визначати ефективність різних пластифікаторів з урахуванням типу цементу. Відповідно метою роботи є визначення впливу пластифікаторів різного типу на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів.

Порівняно міцність бетонів з чотирма пластифікаторами: Поліпласт СП-1 (на основі суміші натрієвих солей і поліметиленуфталінсульфоокислот); Coral ExpertSuid-5 (на основі полімерів карбонових кислот та ефірів), Coral MasterSilk (на основі лігносульфонатів) і Sika® Plastiment®-1230 (виробляються на основі лігносульфонатів). Усі добавки вводилися у двох дозуваннях – 0,8 і 1,2% від маси цементу. Використовувався цемент ПЦ П/А-Ш-500 Р-Н у кількості 350 кг/м<sup>3</sup>, щебінь фракції 5-20 мм і митий кварцовий пісок з модулем крупності 2,4.

Рухомість всіх бетонних сумішей була рівною S1, відповідно залежала від складу бетону. Встановлено, що використання Coral ExpertSuid-5 В/Ц дозволяє найбільш істотно знизити В/Ц. Застосування Coral Master Silk дозволяє знизити В/Ц в дещо меншому ступені. СП-1 і Sika® Plastiment®-1230 мають приблизно однакову і найменшу ефективність у зниженні водопотреби суміші.

Встановлено, що у проєктному віці найбільшу міцність (55,9-57,5 МПа) мають бетони жорстких дорожніх покриттів, модифіковані пластифікаторами Coral ExpertSuid-5 і Sika® Plastiment®-1230. У віці 3-х діб найбільшу міцність мають бетони з добавкою Coral ExpertSuid-5. Зростання дозування даних двох пластифікаторів від 0,8% до 1,2% підвищує ранню міцність бетону, але не викликає змін міцності у проєктному віці. Міцність модифікованих добавками Поліпласт СП-1 і Coral MasterSilk бетонів була нижчою у ранньому і проєктному віці. Тобто з урахуванням використання сумішей невисокої рухомості та цементу ПЦ П/А-Ш-500 Р-Н ефективність у підвищенні міцності бетону у проєктному віці добавки на основі полімерів карбонових кислот є приблизно рівною ефективності добавки на основі лігносульфонатів.

**Ключові слова:** жорстке дорожнє покриття, суперпластифікатор, ефективність, бетон, міцність.

Стаття надійшла до редакції 4.06.2024

**STUDY OF STRENGTH AND STRAINS OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON FILLED POLYMERS**<sup>1</sup>**Trykoz L.V.**, D.Sc., Professor,

lvtrikoz@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8531-7546

<sup>1</sup>**Kamchatna S.M.**, PhD, Associate Professor,

kamchatnayasn@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5711-4146

<sup>1</sup>**Zinchenko O.S.**, postgraduate student,

potatosrumba@gmail.com, ORCID: 0009-0000-3858-8258

<sup>1</sup>*Ukrainian State University of Railway Transport*

7, Feuerbach Sq., Kharkiv, 61050, Ukraine

<sup>2</sup>**Pustovoitova O.M.**, PhD, Associate Professor,

oksana\_pustov@ukr.net, ORCID: 0009-0003-4774-6686

<sup>2</sup>*O.M. Beketov National University of Urban Economy*

17, Marshal Bazhanov str., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>3</sup>**Borodin D.Y.**, PhD, Associate Professor,

dimitriy.graf@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2105-023X

<sup>3</sup>*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*

2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine

**Abstract.** The article aims to study compressive and bending strength of polymer materials and their strains with various amounts of filler to determine the optimal value. The polymer composite material consists of polymethyl methacrylate as a binder and quartz sand as a filler with the fractions at 0.14 mm, 0.315 mm, 0.63 mm. The filler amounts were changed from 100 to 500 weight parts. The strength of polymer filled material was determined by testing cube samples under compressive and beam samples under bending. The strains were determined by testing prism samples under tensile. The study results show the significant impact of the fraction type on the strength and deformation characteristics of composite materials based on polymethyl methacrylate. The samples with the finest fraction of filler 0.14 mm and 150 weight part demonstrate the biggest strength – 90 MPa under compressive and 40 MPa under bending. The increase both particles size and their amount led to the decrease the strength of filled composite. The analysis of the dependencies between stresses and strains shows than deformations drop as far as the amount of mineral filler declines. In proportion as the quantity of filler goes up, the creep deformations occur under less amount of tensile stress. It is linked the less interaction on the border "filler-polymer" and, as consequences, the bigger possibilities of polymer to plastic deformations. Based on obtained dependencies, the patterns of defect development under loading have been proposed that involves taking into account interphase interaction on the borders "filler-polymer" and "filler-filler". The less the particles size, the bigger their specific surface and structure-forming effect. The increase of sand particles size and their amount leads to growth of porosity, goes down the strength of composite material and drops the capability of elastic recoverable strains. The practical importance of this study is the possibility the usage of the filled polymer composites for recovering and renovation works where traditional cost cement fillers are replaced with cheap and ecofriendly fine sand.

**Key words:** filled polymer material, strength, stress, strain, polymethyl methacrylate, filler.

**Introduction.** Filled polymers are an important class of materials due to their stiffness, strength, low density, abrasion resistance, significant electrical properties, and ease of manufacture. They are widely used in civil engineering as a reliable method of mitigating the vibration and dynamic impacts on structures such as bridges and buildings. The application of protective coatings based on various polymers is the most effective method of corrosion protection to isolate the material surface from direct influence of aggressive environments due to the high strength, wear

resistance and resistance to aggressive environments of polymer composite materials. However, each application depends on a unique set of operating conditions, including cyclic loads, impact conditions, tensile conditions, and strain rates. The study of the behaviour of these types of composite materials under different conditions is crucial for design, modelling, and ensuring durability. Time-dependent behaviour, such as creep and stress relaxation, remains a serious problem for predicting the service life of filled polymer composites.

The widespread use of composite materials is hindered by a lack of understanding of their long-term characteristics under operating conditions. Understanding the mechanical failure behaviour, such as fatigue and creep, is crucial for determining the expected service life of structures and estimating the potential maintenance costs. Due to the limited knowledge of the long-term behaviour of polymer filled materials, many applications in civil infrastructure are limited by a conservative consideration of creep. More accurate predictions of creep behaviour are needed to improve cost-effectiveness when replacing standard fillers with waste materials or by-products. Thus, studying the deformation properties and predicting the influence of structural formation features on the ultimate strength of filled polymer composites is a topical task.

**Analysis of recent research and publications.** The inclusion of fillers affects the entire range of properties of filled polymeric materials starting from their manufacture. An increase in the amount of filler leads to a significant rise in the viscosity of polymer mixtures that causes technological difficulties when coatings are applied to the surface [1]. To overcome this negative effect, the authors proposed to introduce highly dispersed amorphous silicon dioxide in addition to aluminosilicate spheres. One of the main disadvantages of polymer materials is a significant amount of shrinkage during application and subsequent curing. As shown by the authors [2], to reduce shrinkage deformations, the most suitable filler is quartz sand with a particle size of 0.14 mm in the amount of 150 weight parts of acrylic polymer. Shrinkage deformations are 5 times less than in the unfilled composition and 10 % less than when filled with Portland cement. In addition, the shrinkage deformations are the smallest when the optimal thickness of the coating is 5 mm. This is explained by the action of the filler surface which orientates the layers of polymer molecules. In turn, this causes strengthening of the nearest polymer layers, but the strength decreases with distance from the surface. As the coating thickness increases, the cohesive forces are less than the tensile stress. It leads to cracking of thicker layers.

Filled polymer compositions are of great importance in the creation of anticorrosion protective coatings [3-5]. The authors of these studies pay attention to the targeted control of the interaction processes between the polymer and fillers to create coatings with high performance characteristics. In paper [3], it is shown that localised areas of the filler particle surface are activators of physical and chemical interfacial bonds during the structure formation of anticorrosion coatings. The optimal combination of a modifier, iron-carbide charge and antioxidant ensures the maximum increase in the degree of gelation of the epoxy matrix and the creation of a barrier to the penetration of an aggressive environment. It is confirmed by the results of experimental studies in [3]. Fillers such as graphite, mica, and aluminium oxide, which differ in chemical nature and particle size, were used in [4] to study the water absorption, chemical resistance, and microhardness of epoxy compositions. Mica has the greatest impact on water absorption and chemical resistance to acids. In the opinion of the authors [4], it is associated with the high concentration of surface hydroxyl groups that act as 'traps' for water molecules. When the amount of mica increases, water absorption and the ability to absorb acids decreases, due to the neutralisation of its surface hydroxyl groups.

To establish the ultimate content of dispersed particles of furnace soot and crystalline boron in an epoxy binder for the formation of protective coatings with the required characteristics, it was proved that when furnace soot particles were introduced in the amount of 15 wt. %, composites with a bending tensile stress of 50.53 MPa and a bending elastic modulus of 3.48 GPa were formed [5]. For the creation of composites with a destructive bending stress of 73.66 MPa and a bending elastic modulus of 4.70 GPa, the critical content of fine-dispersed crystalline boron particles should be 30...40 wt.% per 100 wt.% of polymer. In the study [6], fillers of different chemical nature were used: barium sulfate, calcium carbonate, zinc oxide, metakaolin, microsilica, wollastonite, talc, fly

ash, and blast furnace granulated slag. This allowed us to clarify the principles of using each of these types and determine the most appropriate application. For example, the use of fillers in the form of industrial waste reduces the corrosion resistance of coatings. In contrast, the use of silicates is effective to increase the corrosion resistance of powder coatings.

The deformation mechanisms of carbon black filled rubbers subjected to single and repeated cyclic tensile tests were discussed in the article [7]. For a low filler content, the destruction mainly occurs in the elastic rubber network with an irreversible break in the bonding of the molecular chains. For high filler content, the damage initially occurs in the elastic rubber network, and then the filler network reorganises and carries the load due to the increasing of strain giving way to localised damage near the fillers. As a result, rubber releases both bound at the filler boundary and trapped in the filler aggregates. This partially reversible release includes the loss of weak molecular interactions (chain slippage, physical bonding) and prevents further development of irreversible cavities in the elastically active phase of the rubber during testing.

The properties of filled composite materials are affected not only by the degree of dispersion but also by the shape of the particles. In the work [8], the degree of reinforcement provided by silicon dioxide as a spherical filler with a low aspect ratio and high interaction between fillers was compared with mica as a plate-like filler with a higher aspect ratio and less interaction between fillers. The mechanical characteristics of composites based on epoxy resin reinforced with transverse carbon fibre can be improved by the inclusion of hybrid nano- and microparticles [9]. Fillers in the form of graphene nanoplates in carbon plastic promote interfacial interaction, create a chemical bonding network with the epoxy resin, as well as cause a mechanical blocking effect that increases flexural strength.

The main limitation of filled polymers is their brittle nature mainly due to the low stiffness and low fracture toughness of the resin. It leads to a deterioration of matrix-predominated composite properties including impact viscosity, compressive strength, in-plane shear, fracture toughness and interlaminar strength. However, a wide variety of fillers makes it possible to control the elastic-strength, deformation, and other properties of polymer-based composite materials in a wide range. In the study [10], dispersed fillers such as microcalcite, graphite, and molybdenum disulfide were used to obtain a composite material based on an epoxy binder. The volume content of the filler was 5, 10, 20, 30, or 40 percent of the total volume of the composition. The authors have established the dependence of the composite deformation on the filler content: with an increase in the filler content, the deformation decreases. The epoxy resin samples filled with molybdenum disulfide were less deformed than samples filled with microcalcite and graphite. With an increase in the filler content, the reversible deformation slowed down, and the value of the relative total deformation decreased. In addition, for samples of the polymer composite material containing more than 20 % graphite, the reversible deformation occurs more slowly than for the polymer composite material with microcalcite and molybdenum disulfide at the same volume filler content.

The study [11] was dedicated to investigating the influence of nanofillers added to epoxy composite materials on their mechanical properties. The fillers can react with macromolecules in the epoxy matrix and contribute to a significant improvement in performance. The mechanical properties of these samples were investigated under tensile, compressive, bending and impact loading. The maximum tensile strength was found for the composite material modified with 0.5 wt. % nanosilica. For all types of samples, the tensile strength decreased with the addition of nanoparticles due to their agglomeration. It was found that the highest rising of compressive strength was at 89 % for the sample modified with 0.5 wt. % iron nanoxide. The impact strength was also increased with the addition of nanoparticles. The largest increasing was at 127 % for the nano-iron oxide modified sample. As for bending properties, the highest strength was found for the samples with 1.0 wt. % of nanosilica. The various functionality of the filler surface significantly affects the properties of the composite [12]. It has been shown that the deformation of the system decreases with the strengthening of polymer-filler interaction and with increasing filler proportion. For a system with a weak polymer-filler interaction, it was found that the strain increases with increasing the volume fraction of the filler and was even greater than that of the pure polymer system.

The analysis of the above-mentioned studies shows that there is no strictly unambiguous dependence between the strength and deformability of filled polymer compositions and the quantity and type of fillers. In each specific case, these characteristics depend on the chemical nature of the filler, the size and shape of its particles, and the intensity of surface reactions. Since the cheapest filler is sand, a significant amount of which is formed during the recycling of destroyed concrete structures [13], this study aims to investigate the properties of polymer compositions filled with sand of different fractions.

**Purpose and tasks.** The purpose of this of this study is to investigate the dependence of the strength and deformation of polymeric materials on the amount of filler. This implies the following research tasks: to investigate the compressive and bending strength of a polymer with fillers of different fractional composition; to determine the optimal quantity and type of filler; to analyse the effect of the selected composite material on the development of deformations.

**Materials and research methods.** The composition of the polymer composite material includes polymethyl methacrylate as a binder and quartz sand of 0.14 mm, 0.315 mm, and 0.63 mm fractions as a filler. Samples of the composite material were prepared by mixing polymethyl methacrylate with the hardener and filler. In this case, the amount of the 0.14 mm sand fraction ranged from 120 to 200, and the other fractions – from 200 to 500 mass parts by weight of the polymer part. Such ranges of fillers quantities were substantiated in previous studies [2], where it was found that the smallest shrinkage deformations were observed for filled polymer composites with a fraction of up to 200 wt.%. As for the fillers of larger fractions, their small amount increases the magnitude of shrinkage deformations, so it is advisable to use them in the amount of 200 to 500 wt.%. The strength of the filled polymer material was determined by testing the specimens with short-term static loading under compression and bending. For the axial compression test, cubes with an edge size of 40 mm were used (Fig. 1). For the static bending test, beams with a design span of 65 mm and a cross section of 10 mm × 15 mm were used. Deformations were determined on prisms 40 mm × 40 mm × 160 mm. The measurements were performed using the method of electrical resistance strain gauges on a press with a force gauge scale of 250 kN. Four strain gauges were glued to each edge of the sample along and perpendicular to the line of load action, connected in series, which made it possible to obtain averaged data on the value of longitudinal and transverse deformations. The transverse deformations were measured using a strain gauge station complete with a multipoint switch. After centring the specimens along the physical axis, the load was applied to the specimens in steps of 0.1 R until they were destroyed. The value of longitudinal and transverse deformations was recorded at each loading stage.



Fig. 1. Photo of filled polymer material samples for compression test

**Research results.** It was found that the strength of the filled polymer material is influenced by the proportion of quartz sand and its fraction (Fig. 2).

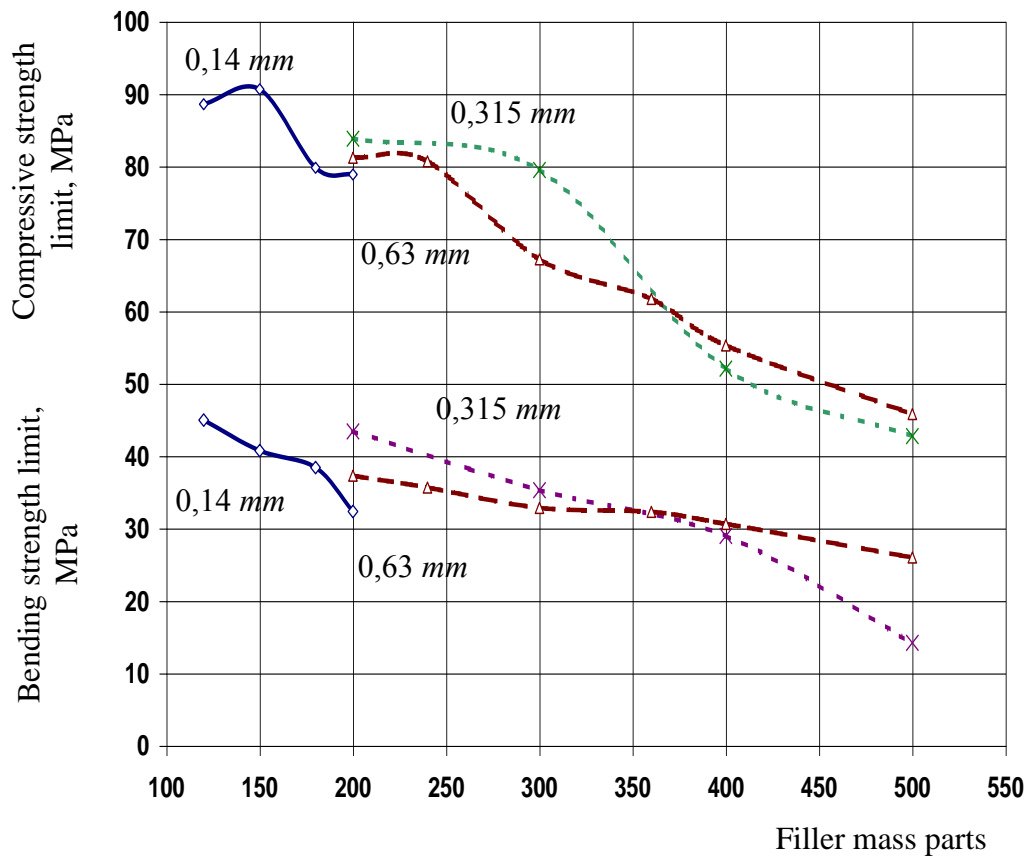


Fig. 2. Dependence of acrylic polymer mortar strength on the amount of filler

Filling the composition with sand with a grain fraction of 0.14 mm from 120 to 200 wt. % changes the compressive strength from 90.7 to 78.9 MPa and bending strength from 44.97 to 32.4 MPa. Filling the composition from 200 to 500 wt. % with sand with a grain fraction of 0.315 mm changes the compressive strength from 83.8 to 42.8 MPa and the bending strength from 43.4 to 24.2 MPa. A similar effect is observed for compositions with sand with a grain fraction of 0.63 mm. The finer the sand, the less it is needed to obtain strong compositions. When fine sands with a fraction of 0.14 mm are used, a decrease in strength of up to 40 % was observed after the introduction of 180 wt.% of sand, while for compositions with sand fraction of 0.315 mm, a decrease in strength was observed after the introduction of 300 wt.%, for compositions with sand fraction of 0.63 mm – 450 wt.%. For acrylic polymer mortar filled with sand grain fraction of 0.315 and 0.63 mm in the amount of 500 wt.%, the strength decreased by 51.5% and 43.8% under compression and 74.9% and 35.1% under bending, respectively.

The test results indicate the structuring role of the filler. Inorganic fillers can initiate the polymerisation process due to the existence of active centres on their surface which act as polymerisation centres and contribute to the formation of a continuous spatial polymer framework. The optimum ratio of filler to polymer is such that the thickness of the acrylic polymer film is sufficient to wet the entire surface of the particles but does not lead to an increase in creep deformation. A significant decrease of strength is explained by exceeding filler concentration that leads to a deficit in polymer volume and, as a result, to a decrease in wettability, disruption of the structure continuity. An increase in the proportion of sand in the composition from 400 to 500 wt. % leads to a decrease of the compressive and bending strength of the polymer mortar by 20%. Thus, with an increase in the proportion of polymer and a decrease in the fraction of quartz sand grains, the strength of the composition increases. It is in good agreement with the general principles of structure formation of composite materials. To study the dependence of the deformations of filled polymeric materials on the amount of filler, the

composition with the highest values of compressive and bending strengths, i.e., samples with a fraction of 0.14 mm, was chosen. The obtained dependences for four filler values are shown in Fig. 3.

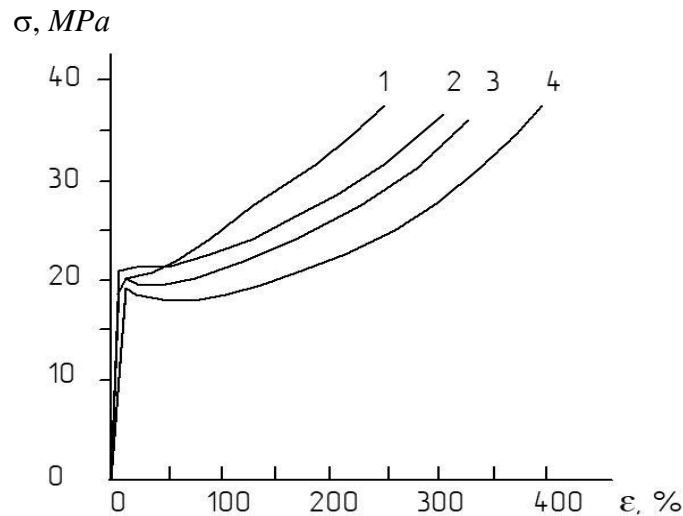


Fig. 3. Stress-strain curves for acrylic polymer mortar with different mass fractions of filler:  
1 – 120 wt. %; 2 – 150 wt.%; 3 – 175 wt.%; 4 – 200 wt.%

The analysis of the longitudinal strain curves (Fig. 3) showed that the deformation decreases when the amount of mineral filler decreases, since an increase in the number of contacts between the polymer matrix and the filler naturally leads to a strengthening of the structure of the filled polymer and decreasing in its internal deformability. An increase in the filler content leads to a noticeable change in the slope of the strain curve associated with strain hardening. This is caused by the formation of micropores, which facilitates the plastic flow of the material. When the content of 0.14 mm sand increases, the deformation pattern changes from homogeneous to heterogeneous, and the yield peak appears (Fig. 3, curve 2). At the same time, the values of stress and strain at the yield strength gradually decrease:  $\sigma_y = 21.5 \text{ MPa}$ ,  $\varepsilon = 12$  for a sand content of 150 wt.%;  $\sigma_y = 19.2 \text{ MPa}$ ,  $\varepsilon = 6$  for a sand content of 200 wt.%. When the mass fraction of the filler increases, the change in creep strain occurs according to patterns that are largely related to the structure of the filled polymer. In the case of a system with a low filling level, there is no formation of a rigid structure of particles in the polymer, and the attraction and interaction of the filler with the polymer chains significantly reduces the load on the composite material. In a highly filled system, the filler particles begin to form aggregates with each other, and the repulsion between similarly charged sand particles promotes the sliding of molecular chains which leads to a continuous increase in strain with an increase in the filling proportion.

**Conclusions.** The results of the study indicate a significant effect of the sand fractional wakeup on the strength and deformation properties of the composite material based on polymethyl methacrylate. The highest strength (90 MPa under compression and 40 MPa under bending) was demonstrated by samples with the smallest fraction of 0.14 mm at an amount of 150 mass parts. An increase in both the particle size and the number of particles leads to a decrease in the strength of the filled composition, which is explained by the disruption of the optimal ratio of the filler particle surface to the amount of polymer that can be adsorbed. Also, for a low filler content, damage mainly occurs in the elastic polymer network, while at a high filler content, deformation occurs with damage initially localised in the elastic polymer network, but which is subsequently localised near the filler-filler interface. This mechanism has been confirmed by tensile deformation studies: at a higher degree of filling, a yield peak appears, and the overall magnitude of deformation increases.

The practical significance of the research is the possibility of using filled polymer composites for restorative repair work, in which traditional expensive cement fillers are replaced with cheaper and

more environmentally friendly fine sand. Further research will be aimed at studying the adhesion of the developed composite materials to the surfaces intended for repair or restoration, as well as the durability of the applied coatings under the influence of various aggressive environments.

### References

- [1] N.V. Saienko, R.O. Bykov, D.V. Demidov, A.V. Skrypynets, T.M. Obizhenko, "Vyvchennia vplyvu sylikatnykh napovniuvachiv na strukturno-reolohichni vlastyvoli akrylovykh dyspersii", *Pytannia khimii ta khimichnoi tekhnologii*, no. 2, pp. 137-144, 2023. doi.org/10.32434/0321-4095-2023-147-2-137-144.
- [2] L.V. Trykoz, S.M. Kamchatna, O.M. Pustovoitova, "Vplyv vydu ta kilkosti napovniuvacha na deformatyvni vlastyvoli akrylovoho kompozytsiinoho materialu dlia remontu betonnykh konstruksii", *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, vol. 74, pp. 122-128, 2019. http://dx.doi.org/10.31650/2415-377X-2019-74-122-128.
- [3] T.V. Cherniavska, "Metod pidvyschennia resursu roboty ustatkuvannia richkovoho ta morskoho transportu zavdiaky vykorystanniu modyfikovanykh zakhysnykh antykoroziiynykh pokryttiv", *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*, 1, no. 22, pp. 74-83, 2020. doi.org/10.33815/2313-4763.2020.1.22.074-083.
- [4] H. Martyniuk, V. Zakodonskyi, N. Skoreiko, O. Aksimentieva, "Vplyv pryrody napovniuvacha na khimichnu stiikist i mikrotverdist plivok napovnenykh epoksydnykh kompozytiv", *Fizyka i khimiiia tverdoho tila*, vol. 16, no. 3, pp. 528-533, 2015. doi.org/10.15330/pcss.16.3.528-533.
- [5] O.O. Saponov, V.D. Nihalatii, K.M. Klevtsov, I.V. Smyrnov, M.A. Dolhov, "Vplyv vmistu i pryrody dribnodispersnoho napovniuvacha na mekhanichni vlastyvoli i strukturu polimernykh zakhysnykh pokryttiv", *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*, vol. 2 (9), pp. 229-237, 2013.
- [6] V.I. Hots, O.V. Lastivka, O.O. Tomin, O.H. Kovalchuk, "Koroziina stiikist poliefirnykh poroshkovykh pokryttiv z vykorystanniam napovniuvachiv riznoi khimichnoi pryrody", *Budivelni materialy ta vyroby*, vol. 1-2, pp. 48-51, 2020. doi.org/10.48076/2413-9890.2020-101-09.
- [7] N. Candau, O. Oguz, E. Peuvrel-Disdier, J.-L. Bouvard, C. Pradille, N. Billon, "Strain and filler ratio transitions from chains network to filler network damage in EPDM during single and cyclic loadings", *Polymer*, vol. 197, pp. 122435, 2020. doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122435.
- [8] H. Roshanaei, F. Khodkar, M. Alimardani, "Contribution of filler–filler interaction and filler aspect ratio in rubber reinforcement by silica and mica", *Iranian Polymer Journal*, vol. 29, pp. 901-909, 2020. doi.org/10.1007/s13726-020-00850-4.
- [9] T. Quadflieg, V.K. Srivastava, T. Gries, S. Bhatt, "Mechanical performance of hybrid graphene nanoplates, fly-Ash, cement, silica, and sand particles filled cross-ply carbon fibre woven fabric reinforced epoxy polymer composites beam and column", *Journal of Materials Science Research*, vol. 12, no. 1, pp. 22-35, 2023. doi.org/10.5539/jmsr.v12n1p22.
- [10] M.S. Ikromova, "Deformation of particulate filled epoxy polymers", *ISJ Theoretical and Applied Science*, is. 04, vol. 120, pp. 282-284, 2023. doi.org/10.15863/TAS.2023.04.120.54.
- [11] A.A. Rajhi, "Mechanical Characterization of Hybrid Nano-Filled Glass/Epoxy Composites", *Polymers*, vol. 14, pp. 48-52, 2022. doi.org/10.3390/polym14224852.
- [12] Z. Chang, Y. Wang, Z. Zhang, K. Gao, G. Hou, J. Shen, L. Zhang, J. Liu, "Creep behavior of polymer nanocomposites: Insights from molecular dynamics simulation", *Polymer*, vol. 228, pp. 123895, 2021. doi:10.1016/j.polymer.2021.123895.
- [13] L.V. Trykoz, O.S. Zinchenko, A.V. Nykytynskyi, O.V. Romanenko, "Otsiniuvannia hranulometrychnoho skladu vtorynnykh zapovniuvachiv, otrymanykh iz vidkhodiv betonu", *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT*, vol. 206, pp. 121-128, 2023. doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296685.

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ І ДЕФОРМАЦІЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ  
НА ОСНОВІ НАПОВНЕНИХ ПОЛІМЕРІВ

<sup>1</sup>Трикоз Л.В., д.т.н., професор,  
lvtrikoz@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8531-7546

<sup>1</sup>Камчатна С.М., к.т.н., доцент,  
kamchatnayasn@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5711-4146

<sup>1</sup>Зінченко О.С., аспірант,  
potatosrumba@gmail.com, ORCID: 0009-0000-3858-8258

<sup>1</sup>Український державний університет залізничного транспорту  
пл. Фейєрбаха, 7, Харків, 61050, Україна

<sup>2</sup>Пустовойтова О.М., к.т.н., доцент,  
oksana\_pustov@ukr.net, ORCID: 0009-0003-4774-6686

<sup>2</sup>Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002, Україна

<sup>3</sup>Бородін Д.Ю., к.т.н., доцент,  
dimitriy.graf@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2105-023X

<sup>3</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна

**Анотація.** Метою даної роботи є вивчення залежності міцності при стиску та згині і деформацій полімерних матеріалів від кількості наповнювача для визначення його оптимальної кількості. Полімерний композиційний матеріал складається із зв'язуючого поліметилметакрилату і наповнювача – піску кварцового фракцій 0,14 мм, 0,315 мм, 0,63 мм. Кількість наповнювачів кожної фракції змінювалася від 100 до 500 масових частин. Міцність полімерного наповненого матеріалу визначали випробуванням зразків-кубів на стиск і зразків-балочок при згині. Деформації визначали на зразках-призмах при їх розтягуванні. Результати дослідження свідчать про значний вплив фракційного складу піску на міцнісні і деформативні властивості композиційного матеріалу на основі поліметилметакрилату. Найбільшу міцність (90 МПа при стиску і 40 МПа при згині) продемонстрували зразки із найменшою фракцією наповнювача 0,14 мм при кількості 150 масових частин. Збільшення як розміру частинок так і їх кількості призводить до зменшення міцності наповненої композиції. Аналіз залежностей напруження-деформації показав, що деформації знижуються зі зменшенням кількості мінерального наповнювача. При збільшенні кількості наповнювача деформації текучості з'являються при менших значеннях напруження розтягу, що пов'язано із меншою взаємодією на границі наповнювач-полімер і, за рахунок цього, більшої здатності полімеру до пластичних деформацій. На основі отриманих залежностей запропоновано механізм розвитку пошкоджень структури при навантаженні, який полягає у врахуванні міжфазної взаємодії на границях розподілу полімер-наповнювач і наповнювач-наповнювач. Менший розмір частинок наповнювача призводить до збільшення їх питомої поверхні і більшої структуруючої ролі поверхні. Збільшення розмірів частинок піску і їх кількості збільшує пористість матеріалу, що зменшує міцність композиційного матеріалу і здатність до пружних оборотних деформацій. Практичне значення проведених досліджень полягає у можливості застосування наповнених полімерних композитів для відновлювальних ремонтних робіт, в яких традиційні дорогі цементні наповнювачі замінено більш дешевим і екологічним дрібним піском.

**Ключові слова:** наповнений полімерний матеріал, міцність, напруження, деформації, поліметилметакрилат, наповнювач.

Стаття надійшла до редакції 28.03.2024

**EFFECTIVENESS OF DECENTRALIZED HEAT SUPPLY BASED ON  
TRADITIONAL HEAT GENERATORS WITH VAPOR COMPRESSION ENERGY  
TRANSFORMATION OF LOW-TEMPERATURE SOURCES**

<sup>1</sup>**Petrash V.D.**, Doctor of Technical sciences, Professor,  
petrant@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0413-233X

<sup>1</sup>**Baryshev V.P.**, PhD, Associate Professor,  
baryshev@odaba.edu.ua, ORCID: 0009-0007-9086-3211

<sup>1</sup>**Shevchenko L.F.**, PhD, Associate Professor,  
bgedyx7@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3296-3007

<sup>1</sup>**Geraskina E.A.**, PhD, Associate Professor,  
poselok@te.net.ua, ORCID: 0000-0002-3308-3776

<sup>1</sup>**Golubenko A.V.**, postgraduate student,  
andrey.ovk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3891-7813

<sup>1</sup>*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
4, Didrikhson str., Odessa, 65029, Ukraine

**Abstract.** The research is devoted to solving the urgent problem of increasing the efficiency of decentralized heat supply of public buildings and industrial enterprises with typical municipal and industrial heat generators on the basis of heat pump energy conversion of pre-cooling of heat flows of the return energy carrier from the heat network, initial cold water and flue gases.

The aim of this work was to analyze and identify conditions that would increase the energy efficiency of the improved system while expanding the total volume of generated heat for decentralized heat supply. Additionally, the work aimed to ensure the environmental friendliness of primary fuel energy use. The proposed approach aims to improve the energy and environmental performance of heat sources by regulating the temperature of the waste energy carrier to its design value, following a standardized temperature schedule.

The most important result of the study of the improved system of decentralized heat supply is the established generalized dependence of determining the actual conversion coefficient in the heat pump operation. It allows qualitative analysis of the dependence of energy efficiency of the heat supply system on the temperature change of the analyzed low-temperature sources, the ratio of the above-mentioned water flow rates and the influence of cold water distribution for municipal and industrial-technological purposes.

The results of the analytical study of the improved heat supply system create a basis for adjusting the temperature schedule of heat supply, taking into account the characteristic conditions of decentralized heat supply and heat consumption modes of municipal and industrial systems.

**Keywords:** heat-generating plants, heat supply, vapor-compression transformation, integrated heat, conversion coefficient.

**Introduction.** The aim of the solution to the urgent energy-saving problem is to increase the efficiency of decentralized heat supply to public buildings and industrial enterprises. This will be achieved by using typical municipal and industrial heat generators based on the vapor-compression transformation of integrated energy from low-temperature heat sources. After cooling, the waste energy carrier (WEC) from the heating network, the initial cold water and flue gases can be used to increase the total amount of generated heat, resulting in improved energy and environmental efficiency of primary fuel use.

**Analyzing of resent research and publication.** The construction and reconstruction of objects must adhere to normative requirements for thermal protection [1]. Modernization of heating

systems can provide opportunities to appropriately reduce the design capacity of heat supply systems. European countries such as Germany, Sweden, Holland, Finland, and Denmark have had positive experiences with energy saving. They have developed heat supply technologies that use a reduced temperature schedule, which depends on the outside air temperature. The maximum design temperature in the distribution mains is 90–120°C, and in the return, it is 40–70°C. These values differ significantly from the similar values of domestic standards. Therefore, it is necessary to adjust the water temperature in the existing heat networks, considering their service life, changes in heat load, physical condition, and seasonal variations in outside air temperature and time of day. Improving the regulation of heat supply for subscriber systems can reduce consumption by up to 50% [2], especially during transitional periods. It is also important to stabilize the thermal-hydraulic regime of heat networks during operational and technological changes, as well as during periodic operation of industrial enterprises throughout the day.

Reference [3] highlights that an increase in WEC temperature leads to a decrease in fuel consumption efficiency for heat generators and electricity consumption for circulation pumps, resulting in a further increase in heat consumption in the mains.

Several studies have focused on improving systems [4, 5] that utilize cold water and exhaust gases through recuperative and contact methods. Precooling and stabilization of the temperature of the working fluid can increase the efficiency of heat generating plants and exergy efficiency by expanding the range of operating temperatures.

The utilization of the initial cold water's available potential for industrial, technological, and municipal purposes is becoming increasingly attractive, especially during transitional and inter-heating periods of the year. This is particularly true for the southern regions of Ukraine, where water is supplied from open sources in civil buildings and industrial enterprises. The temperature of the water during this period typically ranges from 10 to 20°C [6].

Industrial enterprises have numerous low-temperature heat sources that can be used to create more efficient combined heat supply systems. Utilizing flue gas aftercooling heat from heat generators is a relevant way to further improve energy-saving and environmental friendliness of heat supply systems.

The heat generating plant has a resource of up to 8–10% in its heat balance. Reducing nitrogen oxide emissions from boiler units is a challenging and pressing ecological issue in heat supply. Previous research [7] has identified deep cooling of flue gases as a promising approach to significantly improve fuel utilization.

In their study [8], the authors investigated a centralized heat supply system with extended heat pump capabilities. The device improves the efficiency of heat supply to remote consumers while reducing the temperature schedule. This increases the economic efficiency of heat network operation by using the energy potential of WEC as a low-temperature source.

The paper [9] presents studies of a new system for utilization of flue gas heat. The system combines recuperative and contact heat extraction using thermal transformer technologies for further utilization in municipal and industrial-technological systems.

Paper [10] analyses the peculiarities of heat pumping units with electric and gas turbine compressor drive.

Based on a critical analysis of pipeline and equipment conditions and known approaches to heat supply system reconstruction, Authors [11] have defined a general indicator for preliminary assessment of conditions to improve the efficiency of modernized centralized and decentralized heat supply systems using heat pump technologies.

In reference [12], a heat supply scheme is proposed that allows for the redistribution of heat flows among individual mains with different inertia loads. This scheme corrects the optimal schedule of daily heat consumption using heat pump technologies.

Therefore, it is clear that the combined use of available low-temperature sources through thermo-transformer technologies offers the prospect of further energy-efficient heat supply improvements. The reduction of primary fuel consumption and harmful impact of exhaust gases on the environment results in an increase in ecological efficiency.

**Purpose and Objectives of the Study.** The aim of this project is to improve the decentralized heat supply system with steam-compression conversion of the energy potential of WEC, general-purpose cold water and flue gases after the heat generator. In the course of the following theoretical analysis the ways of increasing the energy and environmental efficiency of the system while increasing the total resource of the produced heat will be studied. At the same time, the characteristic operating conditions of the corresponding subsystems in different periods of the year will be taken into account. The set task is solved by analytical substantiation of rational device and possibilities of highly efficient heat pump system of heat supply. Rational operating conditions are determined by adjusting the temperature of the energy carrier after the condenser of the HPU at the inlet to the heat generator, using the integral potential of aftercooling from the given low-temperature sources.

**Materials and methods of the research.** *The system's design and operation are structured and functional.* The proposed system is shown in Fig. 1. It works in the following way: The spent energy carrier enters the heat exchanger 2 through pipeline 1 for pre-cooling during the regulation of the heat supply system. After passing through the evaporator 3, a portion of the working fluid, controlled by the three-way temperature regulator 4, is directed to the regenerative heat exchanger 10 via branch section 5 and circulation pump 6, while the rest is directed to the recirculation pipeline 8. The recirculation part of the WEC flows through pipeline 9 and into pipeline 1 of the heat network. The recirculation part of the WEC flows through pipeline 9 and into pipeline 1 of the heat network.

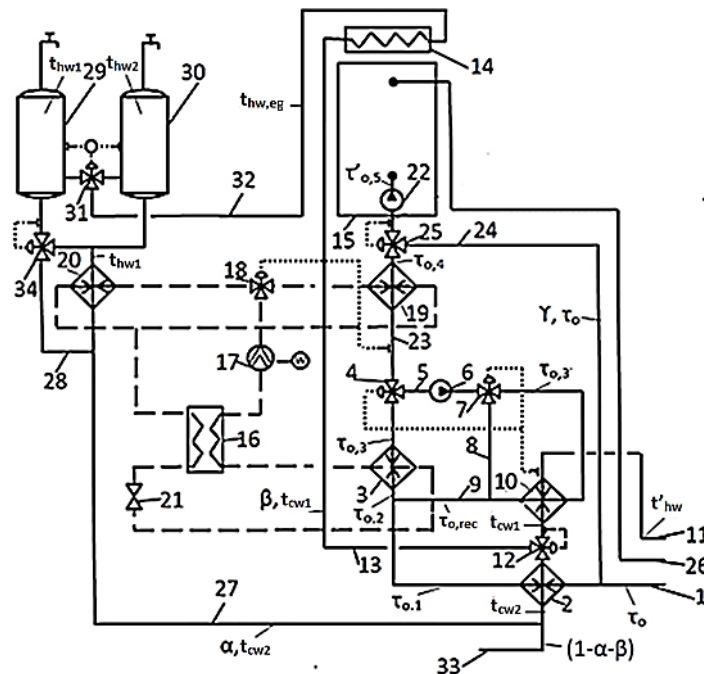


Fig. 1. Schematic diagram of the device of a thermo-transformer system for decentralized heat supply based on integrated WEC aftercooling energy, initial cold water and flue gases after the heat generator:

- 1 – heat network return pipeline; 2 – recuperative heat exchanger; 3 – heat pump evaporator;
- 4 – three-way temperature regulator; 5 – recirculation pipeline; 6 – circulation pump; 7 – three-way temperature regulator; 8 – branch section of recirculation pipeline; 9 – general recirculation pipeline; 10 – heat exchanger; 11 – initial cold water pipeline; 12 – three-way temperature regulator;
- 13 – pipeline to the exhaust gas aftercooling heat exchanger; 14 – exhaust gas heat extraction heat exchanger; 15 – heat generator; 16 – heat pump regenerative heat exchanger; 17 – heat pump compressor with external drive; 18 – three-way temperature regulator; 19, 20 – first and second parts of the condenser connected in parallel; 21 – throttle valve; 22 – circulation pump; 23 – pipeline of the exhaust heat carrier from the network; 24 – bypass pipeline; 25 – three-way temperature regulator;
- 26 – main pipeline of heat network; 27, 28 – distribution pipelines for two-level hot water supply; 29, 30 – accumulator tanks for two-level hot water supply; 31 – two-way temperature regulator with temperature difference sensor for hot water distribution; 32, 33 – pipelines for hot water supply and heat-technological purposes; 34 – three-way temperature regulator.

Part of the pre-cooled general purpose cold water from the pipeline 11, which has been additionally cooled after passing through the regenerative heat exchanger 10, is directed to the heat exchanger 14 via a pipe branch 13 by means of a three-way temperature controller 12. This is done in order to additionally cool the flue gases after the heat generator 15. The heated water is brought to the appropriate temperature by the heat of the flue gases and is fed through a pipeline 32 to a temperature distribution regulator 31, which includes a temperature difference sensor and a branch line. The water is then distributed to storage tanks 29 and 30 for a two-temperature hot water system.

*Analytical study of the conditions required for energy efficient operation of the system.* Analysis of the system operation shows that the total flow rate of initial cold water in decentralized heat supply conditions is determined by the needs of industrial-technological and municipal-domestic purposes, providing a two-level hot water supply, i.e.  $G_{tec}, G_{hw}$ , because  $G_{cw} = G_{tec} + G_{hw}$ , and the total water consumption for two-level hot water supply  $G_{hw}$  is determined by its respective components:  $G_{hw} = G_{hw1} + G_{hw2}$ .

Taking into account the reasonable distribution of cold water, its components for hot water supply are defined as:

$$G_{hw1} = \beta G_{cw}; \quad G_{hw2} = \alpha G_{cw}, \quad (1)$$

where  $\alpha, \beta$  – corresponding parts of the cold water flow rate entering the heat exchangers 14 and 20.

In this case, the temperature of cold water for general purpose  $t_{cw1}$  in engineering practice logical to take [11, 18] equal to  $5^\circ \text{C}$  for the boundary conditions of countercurrent scheme of modern plate heat exchangers 10 with the highest efficiency of the heat-exchange process. For these conditions, the temperature of the recirculation part WEC after the heat exchanger 10  $\tau_{0,rec}$  is naturally higher by  $5^\circ \text{C}$ . Therefore, based on the above-mentioned engineering approach, after appropriate transformations, dependence  $t_{cw1}$  (5) takes the following form:

$$t_{cw1} = t_{cw} - \frac{\rho(1-\gamma)G_{wt}(\tau_{0,rec} - \tau_{0,3})}{G_{cw}}, \quad (2)$$

where  $\rho$  – the recirculation coefficient of pre-cooled WEC through the heat exchanger 10;

$\tau_{0,3}$  – temperature of WEC in the recirculation circuit after the heat exchanger 3.

Heat of cooling of initial cold water in the process of recuperative heat exchange in heat exchangers 10 and 2 is expressed by the dependence:

$$Q_{hw1} = c_p \alpha G_{cw} (t_{cw} - t_{cw2}). \quad (3)$$

As a result of heat exchange process of initial cold water in heat exchanger 2 with WEC with flow rate  $(1-\gamma)G_{wec}$ , its temperature increases to  $t_{cw2}$ , respectively:

$$t_{cw2} = t_{cw1} + \frac{G_{wec}}{G_{cw}} \frac{(1-\gamma)}{(1-\beta)} (\tau_0 - \tau_{0,1}), \quad (4)$$

where  $\gamma$  – part of the total flow rate WEC  $G_{wec}$ , coming through the bypass pipe 24.

From dependence (4), the temperature relationship follows in the following form:

$$\tau_{0,1} = \tau_0 - \frac{(1-\beta)G_{cw}}{(1-\gamma)G_{wec}} (t_{cw2} - t_{cw1}). \quad (5)$$

From the equality of heat fluxes of utilized heat of exhaust gases to its generated power for hot water supply, the dependence of the corresponding temperature of water heating  $t_{hw,eg}$  is represented in the following form:

$$t_{hw,eg} = t_{cw1} + \frac{c_{p,eg} G_{eg} (t_{eg,b} - t_{eg,e})}{c_p \beta G_{cw}}. \quad (6)$$

On the basis of the established dependence (6) determine the conditions of heat utilization and rational ratio of heated water and flue gas flow rates  $\beta G_{cw}, G_{eg}$  taking into account the balance of the corresponding heat flows.

It is known that the energy efficiency of vapor-compression thermo-transformers is determined by the actual conversion coefficient in the form of the ratio of energy flows [11, 18] in accordance with the dependence:

$$\varphi = \frac{Q_c}{W_c}, \quad (7)$$

where  $Q_c$  – thermal power of the condenser with the total heat flux  $Q_{c1}, Q_{c2}$  in condensers 19, 20;

$W_c$  – is the thermal equivalent of the external drive power in the heat pump compressor operation, which is given as  $W_c = Q_{c1} + Q_{c2} - Q_v$ .

In the recuperative heat exchanger 10, the recirculation part WEC takes the heat of cooling of the initial cold water with a common flow rate  $G_{cw}$  for municipal and technological purposes. For this process, the following relationship is valid:

$$c_p G_{cw} (t'_{cw} - t_{cw1}) = c_p \rho (1 - \gamma) G_{wec} (\tau_{0,rec} - \tau_{0,3}), \quad (8)$$

where  $\tau_{0,rec}$  – temperature of recirculation coolant after heat exchanger 10, °C;

$\tau_{0,3}$  – temperature WEC in the recirculation circuit after the heat exchanger 3, according to [19] it is recommended to take equal to 5 °C.

From the relation (8) the dependence of the recirculation coefficient of pre-cooled WEC through the heat exchanger 10 is determined as follows:

$$\rho = \bar{G} \frac{(t'_{cw} - t_{cw1})}{(1 - \gamma)(\tau_{0,rec} - \tau_{0,3})}, \quad (9)$$

where  $\bar{G} = \frac{G_{cw}}{G_{wec}}$  is the ratio of the total flow rate of cold water and WEC from the heat network.

On the basis of the ratio of heat flows of pre-cooled WEC and its recirculation part respectively with temperatures  $\tau_{0,1}$  and  $\tau_{0,rec}$  the temperature of their mixture at the inlet to the evaporator 3 of HPU is determined, which after the appropriate simplification takes the form:

$$\tau_{0,2} = \frac{(\tau_{0,1} + \rho \tau_{0,rec})}{1 + \rho}. \quad (10)$$

The heat of cooling of WEC and its recirculation part in evaporator 3 is determined according to the dependence:

$$Q_v = c_p (1 + \rho) (1 - \gamma) G_{wec} (\tau_{0,2} - \tau_{0,3}). \quad (11)$$

The cooling temperature WEC after the evaporator 3 is determined, taking into account the dependence  $Q_v$ , (11), as:

$$\tau_{0,3} = \tau_{0,2} - \frac{Q_v}{c_p (1 - \gamma) (1 + \rho) G_{wec}}. \quad (12)$$

In practice of development [19] of such systems, the temperature  $\tau_{0,3}$  is limited to its minimum value  $< 5^\circ\text{C}$ .

Note that WEC with the flow rate  $(1 - \gamma) G_{wec}$  with the set temperature  $\tau_{0,3}$  enters the condenser 19. As a result, the temperature dependence  $\tau_{0,4}$  of WEC after condenser 19, taking into

account dependence  $\tau_{0,3}$ , (12), takes the following form:

$$\tau_{0,4} = \tau_{0,2} - \frac{Q_v}{c_p(1-\gamma)(1+\rho)G_{wec}} + \frac{Q_{c2}}{c_p(1-\gamma)G_{wec}}. \quad (13)$$

Consequently, WEC with the temperature after the condenser 19 with bypass flow  $\gamma G_{wec}$  and the temperature  $\tau_0$ , at the inlet to the heat generator 15  $\tau_{0,5}$ , is determined according to the relation:

$$\tau_{0,5} = \gamma\tau_0 + (1-\gamma)\tau_{0,4}. \quad (14)$$

Dependences  $Q_{c1}$  and  $Q_{c2}$ , taking into account the regime parameters  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\bar{G}$  and temperature  $t_{cw2}$  according to (4), take the following form:

$$Q_{c1} = c_p \alpha G_{cw} \left( t_{hw} - t_{cw1} - \bar{G} \frac{(1-\gamma)}{(1-\beta)} (\tau_0 - \tau_{0,1}) \right). \quad (15)$$

$$Q_{c2} = c_p (1-\gamma) G_{wec} (\tau_{0,4} - \tau_{0,3}). \quad (16)$$

Taking into account the above equations of heat flows  $Q_v$ ,  $Q_{c1}$ ,  $Q_{c2}$  and temperature of pre-cooling of initial cold water  $t_{cw1}$  after the heat exchanger 10, the dependence of the actual conversion factor  $\varphi$  in the operation of the improved decentralized heat supply system based on the transformation of energy flows of pre-cooling WEC, initial cold water of general purpose and flue gases, after appropriate transformations, takes the final form:

$$\varphi = \left[ 1 - \frac{(1-\gamma)(1+\rho)(\tau_{0,2} - \tau_{0,3})}{A+B} \right]^{-1}, \quad (17)$$

$$\text{where } A = \alpha \bar{G} \left( t_{hw} - t_{cw} + \frac{\rho(1-\gamma)G_{wt}(\tau_{o,rec} - \tau_{o,3})}{G_{cw}} - \frac{1}{\bar{G}} \frac{(1-\gamma)}{(1-\beta)} (\tau_0 - \tau_{0,1}) \right);$$

$$B = (1-\gamma)(\tau_{0,3} - \tau_{0,4}).$$

**Results of the research.** The initial cold water temperature  $t'_{cw}$  for general use is determined based on the corresponding period of the year's outdoor air temperature. The current temperature  $\tau_0$  is determined according to the operational control schedule for decentralized heat supply systems, using its calculated values  $(\tau_r - \tau_0) = (95 - 70 \text{ }^\circ\text{C})$ .

Operating conditions were determined based on reasonable parameter values:  $\bar{G} = 0.1 \div 1.5$ ,  $\alpha = 0.1 \div 0.15$ ,  $\beta = 0.05$ ,  $\gamma = 0.0$ .

Fig. 2 illustrates the dependence of the actual conversion coefficient  $\varphi$  on the ratio  $\bar{G}$  of the initial cold water and WEC flow rates in the range of limiting values of its temperatures  $\tau_0$  in the heating period, taking into account insignificant changes in the cold water temperature  $t'_{cw}$ . From the graphical dependencies is evident the area of rational values of conversion coefficient of energy flows in HPU on the whole range of possible ratio of the total flow rate of cold water and WEC. From the analysis of the graphs also follows a significant increase in its increase when the temperature of WEC to the design value in extreme conditions of the heating period. It is obvious that the change in the conversion coefficient  $\varphi$  is significantly affected by the selected value of the intermediate temperature WEC after the condenser 19  $\tau_{0,4}$ . In particular, in the range of the real ratio of the indicated flow rates  $\bar{G} = 0.5 \dots 1.0$ , the conversion coefficient  $\varphi$  increases significantly at a lower temperature  $\tau_{0,4} = 45^\circ\text{C}$  compared to its value  $\tau_{0,4} = 55^\circ\text{C}$ .

The specified result indicates the essential influence of the intermediate temperature  $\tau_{0,4}$  on the efficiency of the system, and accordingly the importance of substantiation of its necessary value after the condenser 19 at the inlet to the heat generator 15 for the analyzed system of decentralized heat supply. It should be noted that the obtained result of increasing the energy efficiency of the improved system of municipal and industrial-technological heat supply is in positive agreement with the increase in cold water consumption in transitional conditions of the heating period with its characteristic growth at the enterprises, in particular, industrial-technological and processing industry.

The results of the analysis of graphical dependencies also indicate the inexpediency of additional heating of WEC after the condenser HPU at the inlet to the heat generator to high temperatures, in particular to the design value  $\tau_{0,4} = 70^\circ\text{C}$  over the entire range of the analyzed ratio of flow rates.

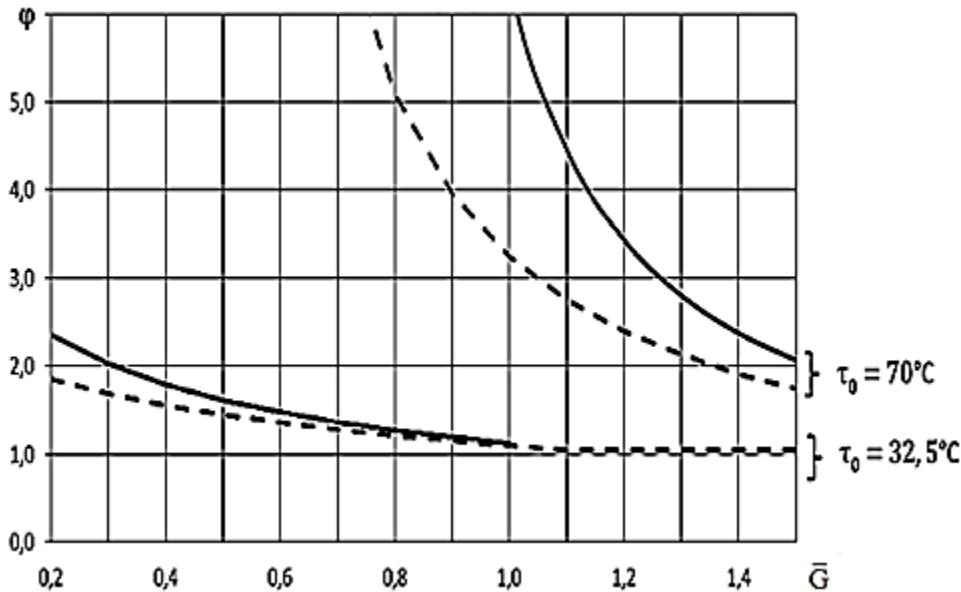


Fig. 2. Dependence of the actual conversion coefficient on the ratio of flow rates of initial cold water and waste heat carrier from the heating network in the operation of the system under design conditions and at the final stage of the heating period. For conditions  $\beta = 0.1$  and  $\gamma = 0.0$ :

— at  $\tau_{0,4} = 45^\circ\text{C}$ ,  $\alpha = 0.1$ ; - - - - at  $\tau_{0,4} = 55^\circ\text{C}$ ,  $\alpha = 0.1$

Additional calculation-analytical study established the dependence of the actual conversion coefficient  $\varphi$  on the intermediate temperature  $\tau_{0,4}$  WEC according to the generally accepted schedule of operational regulation of decentralized heat supply systems when the ambient temperature  $t_a$  changes during the heating period. The results confirm the possibility of providing a sufficiently high-energy efficiency of the improved heat supply system, as well as the positive effect of reducing the ratio  $\bar{G}$  of the above-mentioned water flows in a wide range of changes, typical for most industrial-technological enterprises.

#### Conclusions:

1. For the improved decentralized heat supply system, a generalized dependence is established to determine the actual conversion coefficient of the HPU based on the integrated sub-cooling potential of the WEC, initial cold water and flue gases. This allows a qualitative analysis of the energy efficiency of the heat supply system. For this purpose, the temperature changes of the analyzed low-temperature sources, the ratio of reduced water consumption and the influence of the regime distribution of cold water for municipal and industrial-technological purposes are investigated.

2. For the proposed system it is established that the change of the actual conversion coefficient is significantly influenced by the value of the intermediate temperature WEC after the condenser at the inlet to the heat generator. From the results of the analytical study it follows that the ra-

tional value of the temperature of steam compression heating WEC after the condenser at the inlet to the heat generator should be based on the thermo-economic optimization of the calculated difference of the temperature of condensation during heating of the subscriber coolant and boiling of the working body in the HPU evaporator.

3. The results of the analytical study of the improved system of decentralized heat supply create the basis for its technical development with justification of the rational intermediate temperature of the cooling medium in the sequential process of heat generation according to the two-stage scheme in a traditional heat generator with HPU for its consumption at municipal and industrial-technological enterprises.

### References

- [1] DBN V.2.6-31:2021. Teplova izolyatsiya ta energoefektyvnist' budivel'. Kii'v, Ministerstvo rozvitku gromad ta teritoriy Ukraïni, 2022.
- [2] I.A. Red'ko, A.A. Red'ko, A.V. Priymak, N.G. Lansberg, "Parametry teplovoy seti pri ponizhennom temperaturnom grafike", *Ventilyatsiya, osveshchenie i teplogaz-osnabzhenie*, vyp. 24, pp. 42–50, 2018.
- [3] N.N. Kisilev, Yu.N. Leonova, "Vliyanie temperatury obratnoy setevoy vody na effektivnost' raboty rajonnykh otopitel'nykh kotel'nykh", *Novosti teplosnabzheniya*, no. 9, (205), pp. 40-42, 2017.
- [4] V.D. Petrash e.a., "Sistema teplokhodosnabzheniya na baze integrirovannoy energii kholodnoy vody i vozdushnykh potokov s pnevmogidravlicheskoj stabilizatsiey termotransformatornykh protsessov". Pat. Ua. no. 109848, 2015.
- [5] F. Adamczuk, "Integration of Powerise Flue Gas Heat Recovery System in Worldwide Largest Fluidized Bed Boiler Lagisza 460 MW Efficiency Increase and CO<sub>2</sub> Reducion", *VGB Power Tech*, no. 12, 337 p., 2008.
- [6] M.V. Vysotskaya, "Kholodnaya voda kak nizkotemperaturnyy istochnik dlya teplonasosnykh sistem teplokhodosnabzheniya zdaniy", *Energoefektivnist' v budivnitstvi ta arkhitekturi*, no. 7, pp. 41-46, 2015.
- [7] V.N. Klimenko, "Nekotorye osobennosti vnedreniya parokompressionnykh termicheskikh nasosov dlya utilizatsii sbrosnoy teploty otopitel'nykh kotlov", *Promyshlennaya teplotekhnika*, t. 31, no. 5, pp. 42-48, 2011.
- [8] O.A. Stepanov, P.A. Tret'yakova, "Sistema tsentralizovannogo teplosnabzheniyaniya s primeneniem teplovykh nasosov", *Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika*, t. 1, no. 4 (4), pp. 43-51, 2015.
- [9] Yu.M. Polunin, V.D. Petrash, "Termotransformatornaya sistema otbora teploty iz ukhodyashchego gaza dlya promyshlennogo teplosnabzheniya". Pat no.100923, Ua, 2013.
- [10] M.N. Chepurnoy, S.I. Tkachenko, N.V. Rezident, "Osobennosti primeneniya parokompressionnykh teplonasosnykh ustanovok", *Energetika i elektrotehnika. Nauchnye trudy VNTU*, no. 2, pp. 1-8, 2013.
- [11] V.D. Petrash, V.P. Baryshev, L.F. Shevchenko, E.A. Geraskina, N.V. Danichenko, "Usloviya energoeffektivnoy modernizatsii sistem teplosnabzheniya na osnove teplonasosnykh tekhnologiy", *Institut energetiki. Problemy regional'noy energetiki. Elektronnoe izdanie*, no. 4 (56), pp. 47-60, 2022. doi: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.4-56.05>.
- [12] A.G. Batukhtin, "Ispol'zovanie teplovykh nasosov dlya povysheniya teplovoy moshchnosti i effektivnosti sushchestvuyushchikh sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya", *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti*, no. 2, pp. 28-33, 2010.

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ  
НА ОСНОВІ ТРАДИЦІЙНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ТЕПЛОТИ З ПАРОКОМПРЕСІЙНОЮ  
ТРАНСФОРМАЦІЄЮ ЕНЕРГІЇ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ**

<sup>1</sup>Петраш В.Д., д.т.н., професор,  
petrash6@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0413-233X

<sup>1</sup>Баришев В.П., к.т.н., доцент,  
baryshev@odaba.edu.ua, ORCID: 0009-0007-9086-3211

<sup>1</sup>Шевченко Л.Ф., к.т.н., доцент,  
bgedyx7@ukr.net, 0000-0003-3296-3007

<sup>1</sup>Гераскіна Е.О., к.т.н., доцент,  
poselok@te.net.ua, ORCID: 0000-0002-3308-3776

<sup>1</sup>Голубенко А.В., аспірант,  
andrey.ovk@gmail.com, ORCID:0000-0002-3891-7813

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

**Анотація.** Дослідження присвячене вирішенню актуальної задачі підвищення ефективності децентралізованого теплопостачання громадських будівель та промислових підприємств з типовими комунально-побутовими і промисловими теплогенераторами на основі парокompресійної трансформації енергії доохолодження теплових потоків відпрацьованого енергоносія з теплової мережі, початкової холодної води димових газів. Метою роботи стало аналітичне обґрунтування умов розширення загального обсягу генерованої теплоти та підвищення ефективності удосконаленої системи децентралізованого теплопостачання, а також екологічності використання енергії первинного палива. Запропонований підхід передбачає підвищення енергетичних та екологічних показників джерел теплоти з регулюванням обґрунтованої температури відпрацьованого енергоносія відносно її розрахункового значення відповідно нормованого температурного графіка. Важливим результатом дослідження є встановлена узагальнена залежність для визначення дійсного коефіцієнта перетворення в роботі теплонасосної системи. Вона дає змогу проводити якісний аналіз залежності енергетичної ефективності системи теплопостачання від зміни температури аналізованих низькотемпературних джерел, співвідношення вищезазначених витрат водних потоків та режимів розподілу холодної води для комунально-побутового та промислово-технологічного спрямування. Встановлено, що значення дійсного коефіцієнта перетворення суттєво залежить від обраної температури підігріву відпрацьованого енергоносія з теплової мережі на вході в теплогенератор. Значне зростання дійсного коефіцієнта перетворення відмічається при збільшенні складової витрати води на гаряче водопостачання технологічного призначення. Встановлено, що підтримка раціональної температури підігріву відпрацьованого енергоносія має базуватись на термoeкономічній оптимізації розрахункової різниці температур абонентського теплоносія та кипіння робочого тіла в випарнику ТНУ. Результати дослідження вдосконаленої системи теплопостачання створюють основу для коригування раціональної температури відпуску теплоти з врахуванням характерних умов децентралізованого теплопостачання та режимів споживання теплоти системами комунально-побутового та промислового призначення.

**Ключові слова:** теплогенеруючі установки, теплопостачання, парокompресійна трансформація, інтегрована теплота, коефіцієнт перетворення.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2024

**ПРОТИЗСУВНІ ЗАХОДИ ДІЛЯНКИ СХИЛУ ОДЕСЬКОГО УЗБЕРЕЖЖЯ**

<sup>1</sup>**Осадчий В.С.**, к.т.н., доцент,  
ovs1455@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8153-8635

<sup>1</sup>**Анісімов К.І.**, доцент,  
anisimov@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0447-3927

<sup>1</sup>**Бааджи В.Г.**, асистент,  
baadzhi@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6974-9082

<sup>1</sup>**Великий Д.І.**, к.т.н.,  
denislusuj@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1452-6742

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

**Анотація.** В роботі виконані розрахунки стійкості ділянки зсувного схилу Одеського узбережжя. Ділянка розташована в Київському районі м.Одеса та примикає до дитячого оздоровчо-спортивного табору «Вікторія». Територія охоплює прибережну частину плато, терасовий схил і ділянку пляжу. В рельєфі схилу виділяються штучно створені тераси та берми, у підніжжі схилу місцями збережений природний пляж.

Особливості даної ділянки полягають в складних інженерно-геологічних (блокова будова схилу, лесові просадні ґрунти) і гідрогеологічних (кілька водоносних горизонтів, високий рівень підземних вод) умовах. Раніше, до проведення комплексу протизсувних заходів, на цій території відбувалися масштабні глибинні зсуви ковзання та видавлювання. Частково виконані заходи інженерного захисту, що полягали в плануванні поверхні схилу та влаштуванні берегоукріплення, не призвели до повної стабілізації зсувних процесів.

В теперішній час на зсувному схилі відбуваються незатухаючі повільно текучі деформації. Ці деформації пов'язані з блоковою будовою схилу, гідрогеологічними умовами, а також реологічними властивостями меотичних глин. Стабілізація зсувних процесів можлива тільки при комплексному підході в призначенні протизсувних заходів.

Оцінка стійкості схилу та призначення протизсувних заходів були виконані з врахуванням особливостей інженерно-геологічної будови, гідрогеологічних умов, а також результатів натурного обстеження схилу. Розрахунки стійкості схилу виконувались за плоскими схемами методами Бішопа та Ямбу. Також розрахунки проводились у тривимірній постановці методом скінченних елементів в геотехнічному програмному комплексі Midas GTS NX. Поведінка ґрунту в розрахунковій схемі описувалась пружно-пластичною моделлю Мора-Кулона. Ця модель заснована на залежності між швидкістю зміни ефективних напружень і швидкістю деформацій.

Запропоновано комплекс протизсувних заходів, що включає: влаштування поглинаючих свердловин на плато, для зниження рівня ґрунтових вод; влаштування нижнього та верхнього ярусів паль-шпонок з вертикальним дренажем над ними; організоване відведення зливових вод з поверхні схилу; планування та кріплення поверхні схилу.

**Ключові слова:** схил, зсув, розрахункова схема, коефіцієнт запасу стійкості, протизсувні заходи, паля-шпонка, дренаж.

**Вступ.** Зсуви відносяться до одного з найпоширеніших та дуже небезпечних екзогенних геологічних процесів. Вони створюють загрозу руйнування будівель та споруд, пошкодження автомобільних і залізничних шляхів, втрати цінних сільськогосподарських земель, травмування та загибелі людей. Зсуви можуть бути викликані як природними, так і антропогенними факторами. Основними природними причинами і чинниками, що

викликають формування та розвиток зсувних процесів є інженерно-геологічні та гідрогеологічні умови, клімат, абразія, ерозія, рельєф місцевості, сейсмічні впливи. Антропогенний вплив пов'язаний з додатковим навантаженням і динамічним впливом на схили під час будівельних робіт, надмірним обводненням зсувонебезпечних територій, витоків з водонесучих комунікацій.

На території України зсуви поширені на узбережжі Чорного і Азовського морів, берегах р.Дніпро, в Закарпатській, Івано-Франківській, Чернівецькій та інших областях. Площі зсувонебезпечних процесів за останні 30 років зросли в 5 разів. В Одеській області відзначена активізація зсувних процесів на ділянках схилів у містах Одеса та Чорноморськ, селищах Фонтанка, Чорноморка і Санжійка. Значне поширення зсувів на території нашої країни пояснюється її геологічною будовою та геоморфологічними умовами.

Освоєння зсувних та зсувонебезпечних ділянок можливе тільки після аналізу інженерно-геологічних і гідрогеологічних умов, обстеження території схилу та оцінки його стійкості. Отримані, в процесі комплексного вивчення схилу, результати повинні використовуватись при розробці протизсувних заходів. Розроблені протизсувні заходи повинні забезпечувати довготривалу стабілізацію зсувного схилу і нормативний коефіцієнт запасу стійкості в залежності від класу наслідків (відповідальності) об'єктів, що захищаються.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Вивченням і описом зсувів Одеського узбережжя займалась велика кількість вчених. За весь період вивчення зсувів одеського регіону було опубліковано більше 100 наукових робіт. Аналізу причин формування зсувів і розробці заходів зі стабілізації зсувних процесів присвячені роботи І.Ф. Синцова, О.К. Алексєєва, М.Ф. Бєсчастного, І.Я. Яцько, А.М. Дранникова, Л.Б. Розовського, І.П. Зелінського, В.М. Воскобойнікова і багатьох інших авторів.

Ряд наукових праць направлений на встановлення закономірностей формування зсувів та оцінку ролі факторів, що впливають на розвиток зсувних процесів [1-3]. В роботі [1] дана загальна характеристика протизсувних заходів Одеського узбережжя. На основі даних багаторічних спостережень за роботою протизсувних споруд показано, що сучасна геодинаміка зсувних схилів визначається сполученням і взаємним зв'язком різних факторів, серед яких найбільше значення має мікроблокова будова зсувних накопичень [1, 2]. Методами лабораторного фізичного і математичного моделювання виявлений механізм формування зон розущільнення в основному деформуємому горизонті зсувів випору. Описаний ефект зниження напорів меотичного водоносного горизонту, який приводить до зменшення швидкостей зсувних деформацій, що передують стадії основного зміщення. Доведена практична доцільність режимних спостережень за п'єзометричними рівнями меотичного водоносного горизонту в зв'язку з прогнозом зсувів [3].

В роботах [4, 5] розглядаються питання розрахунків стійкості зсувів з врахуванням пружно-пластичних властивостей ґрунтів, які моделюються за теорією течії зі зміцненням, при статичних навантаженнях на схил. Цей підхід дозволяє в повній мірі відобразити реальні властивості ґрунтів. Робота [6] присвячена розвитку методів розрахунку схилів та зсувів, а також математичному моделюванню зсувних процесів при сейсмічних впливах.

В роботі [7], на основі аналізу результатів розрахунків реальних схилів м.Одеса, відмічений вплив форми схилу на величину коефіцієнта запасу стійкості. Автором розроблений метод розрахунку стійкості ґрунтових споруд і природних схилів за двовимірними схемами інженерними методами, з врахуванням їх геометричних особливостей.

Незважаючи на велику кількість існуючих методів розрахунків стійкості схилів і укосів, на сьогоднішній день немає єдиного підходу в питаннях вибору розрахункової схеми. Вибір методу розрахунку стійкості конкретного схилу залежить від інженерно-геологічних умов ділянки і типу зсувних деформацій.

Основні вимоги щодо вибору заходів інженерного захисту територій, будівель і споруд від зсувних та обвальних процесів, а також положення розрахунку протизсувних і протиобвальних споруд наведені в нормативних документах [8, 9].

**Мета дослідження.** Метою роботи є розрахунок стійкості ділянки зсувного схилу Одеського узбережжя та розробка комплексу протизсувних заходів для забезпечення загальної стійкості схилу.

**Методи досліджень.** Розрахунки стійкості схилу проводились чисельними методами. Оцінка стійкості в плоскій постановці виконана за методами Бішопа та Янбу за фіксованими кривими ковзання. Розрахунки напружено-деформованого стану схилу за методом скінчених елементів, з визначенням коефіцієнту запасу стійкості методом редукції, виконані в тривимірній постановці.

**Результати дослідження.** Ділянка зсувного схилу розташована в Київському районі м.Одеса та примикає до дитячого оздоровчо-спортивного табору «Вікторія». Територія охоплює прибровочну частину плато, терасовий схил і ділянку пляжу. Відмітки поверхні на пляжі становлять 0,0÷2,0 м, в прибровочній частині плато 40÷41 м. Ширина приморського схилу, від брівки плато до урізу, складає 130÷150 м. Сучасний рельєф древнього зсувного схилу сформований в результаті проведених протизсувних заходів в 1970÷1980рр., в складі яких були виконані часткова зрізка та планування поверхні схилу. В рельєфі схилу виділяються штучно створені тераси та берми, у підніжжі схилу місцями збережений природний пляж.

Схил в верхній частині представляє собою укіс з нахилом поверхні 0,30÷0,45, у підніжжі якого спланована берма шириною 15÷20 м на абсолютних позначках 22,5÷32,5 м. Берма закінчується крутим укосом з насипних ґрунтів, висотою близько 10 м. Нижче, на відмітках поверхні 9,5÷13 м, розташована тераса шириною 60÷80 м, яка знижується у бік моря. Тераса частково забудована легкими будівлями старих баз відпочинку і індивідуальними будинками. В південній частині ділянки розташована дренажна штольня №11. Ближче до моря (в приурізовій зоні) відсипана ще одна тераса шириною 10÷15 м, в підніжжі якої влаштоване берегоукріплення у вигляді кам'яної начерки.

Інженерно-геологічна будова ділянки приведена за даними аналізу вишукувань минулих років, проведених бурових робіт та досліджень фізико-механічних властивостей ґрунтів. План схилу з розташуванням інженерно-геологічних розрізів наведений на рис. 1. Інженерно-геологічна будова схилу показана на характерному розрізі (рис. 2), який знаходиться в центральній частині ділянки схилу. За даними інженерно-геологічних досліджень на ділянці схилу залягають наступні інженерно-геологічні елементи:

ПЕ-0 – насипний шар; ПЕ-2 – суглинок сірий, текучої консистенції; ПЕ-3 – суглинок лесовидний просідаючий, легкий, напівтвердої консистенції; ПЕ-4, 4а – супісок лесовидний просідаючий, напівтвердої консистенції; ПЕ-5, 5а – суглинок лесовидний просідаючий, напівтвердої консистенції; ПЕ-6, 6а – суглинок лесовидний просідаючий, м'якопластичної та текучепластичної консистенції; ПЕ-7, 7а – суглинок лесовидний, напівтвердої консистенції; ПЕ-8, 8а – суглинок лесовидний важкий, м'якопластичної консистенції; ПЕ-9, 9а – суглинок лесовидний важкий, напівтвердої та твердої консистенції; ПЕ-10, 10а – глина легка, твердої консистенції, з включенням карбонатів та гіпсу; ПЕ-11, 11а – вапняк тріщинуватий дуже низької міцності; ПЕ-12, 12а – глина легка, твердої консистенції; ПЕ-13, 13а – суглинок важкий, напівтвердої консистенції, з прошарками глини та супіску; ПЕ-14 – супісок сірий, з прошарками піску пилуватого; ПЕ-15 – глина важка, твердої консистенції; лігніт – глина темно-сіра, напівтвердої консистенції, з прошарками супіску пластичного.

На зсувному схилі залягають ґрунти, аналогічні породам, що розвинуті на плато, зміщені та деформовані внаслідок декількох циклів зсувних процесів. Загальна потужність зсувних накоплень в верхній частині схилу досягає 9÷18 м, в нижній частині схилу 15÷35 м. Зсувні ґрунти не витримані по потужності та простиланню, залягають у вигляді блоків.

Гідрогеологічні умови на плато характеризуються наявністю водоносних горизонтів в лесовидних суглинках (ПЕ-6 та ПЕ-8), вапняках (ПЕ-11), та меотичних відкладеннях (прошарки супіску та суглинка). Верхні водоносні горизонти безнапірні, живляться за рахунок інфільтрації атмосферних опадів; нижній горизонт є напірним, напір від 2 до 10 м.

В верхній частині схилу, ґрунтові води відмічені як в корінних лесовидних суглинках (ПЕ-8), так і в зсувних накопиченнях (ПЕ-6а, 7а). Горизонт утворився за рахунок

виклинювання на схилі підземних вод, що розвинуті на плато. В середній та нижній частині схилу водовмісними є насипні ґрунти (ІГЕ-0), лесовидні суглинки (ІГЕ-2, 4а, 6а, 7а) та вапняк (ІГЕ-11а), відносним водопором служать глини (ІГЕ-10а, 12а). Горизонт безнапірний, живиться за рахунок атмосферних опадів і дренажу на схилі водоносних горизонтів, що розвинуті на плато.



Рис. 1. План схилу з розташуванням інженерно-геологічних розрізів

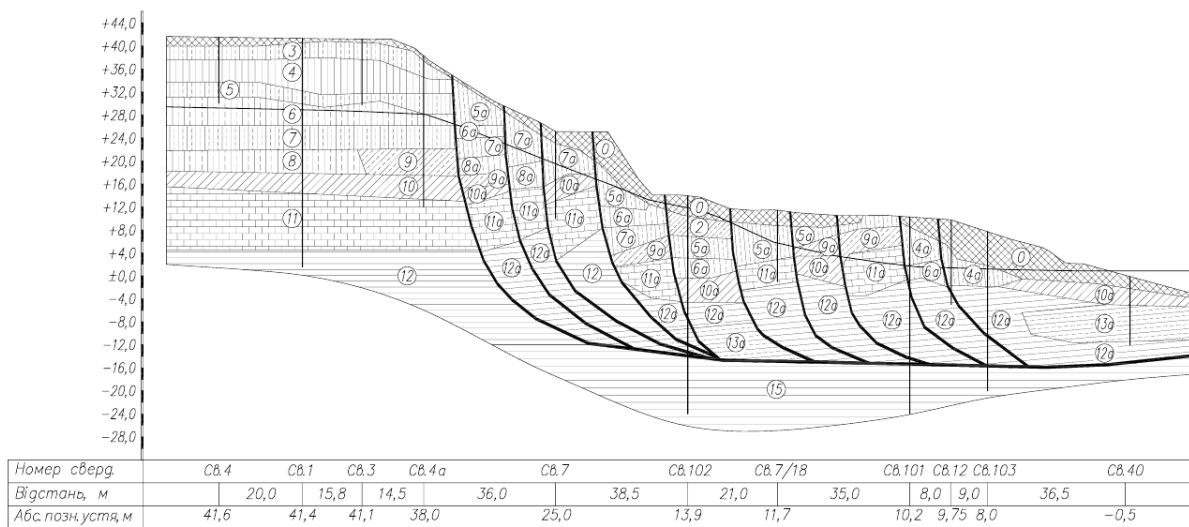


Рис. 2. Розрахунковий інженерно-геологічний розріз 2-2

Перед початком розрахунків стійкості схилу було виконане натурне обстеження схилу. В процесі обстеження фіксувались видимі деформації на поверхні схилу і існуючих спорудах, виходи ґрунтових вод на поверхню та інші ознаки інженерно-геологічних процесів. В прибровочній частині плато, уздовж огороження бази «Вікторія», відмічені ділянки нахилу та видавлення бетонної основи, простежується неглибока (до 20 см) неширока западина. Схил густо засаджений деревами та чагарниками. Рельєф укосу місцями змінений в результаті забудови, існують ділянки, на яких схил підрізаний. На розташованих на схилі будинках та заборах відмічені тріщини.

В нижній частині укосу, на окремих ділянках, відмічаються невисокі (1÷2 м) стінки зриву, у підніжжі місцями спостерігається виклинювання ґрунтових вод на поверхню. Насипні ґрунти рихлі, повільно осипаються, на їх поверхні є заколи та промоїни.

На нижній терасі вздовж бетонної дороги плити лежать нерівно, при русі автомашин по ним відчувається коливання. В декількох місцях цієї дороги утворились озерця та заболочені ділянки. Вода струмочками стікає вбік моря, фільтруючись в ґрунти.

Приурізана частина схилу в північній частині була спланована під час будівництва берегозахисної споруди (контр-банкету) та бетонної набережної, що захищена кам'яною начеркою зі сторони моря. Лінія урізу зміщена вбік моря на 25-35 м. Деформацій на цій території не спостерігається.

Південна частина менш захищена, кріплення цієї ділянки виконувалось силами окремих забудовників. В штольні №11 спостерігаються деформації тубінгів та лотків. В місці скидання дренажної води у море, бетонний лоток зламаний. Також деформована (видавлена) та частково зруйнована підпірна стінка. На цій ділянці пляж майже відсутній, під час штормів стінка піддається силовій дії вітрових хвиль.

Таким чином, за результатами обстеження можна зробити висновок, що виконані протизсувні заходи (планування поверхні схилу та берегоукріплення) не призвели до повної стабілізації зсувних процесів. На зсувному схилі відбуваються незатухаючі повільно текучі деформації, що пов'язані з блоковою будовою схилу, гідрогеологічними умовами, а також реологічними властивостями меотичних глин. Стабілізація зсувних процесів можлива тільки при комплексному підході в призначенні протизсувних заходів.

В якості вихідних даних, для розрахунків стійкості схилу, були прийняті дані інженерно-геологічних вишукувань, а також результати натурального обстеження плато, схилу і прилеглої території. Перехід від опису природних інженерно-геологічних умов до розрахункової схеми був виконаний шляхом схематизації меж ПГЕ та потужності шарів ґрунту порушеної структури.

Схил, який розглядається, відноситься до зсувного [9]. Клас наслідків (відповідальності) споруди прийнятий СС2. Нормативний коефіцієнт запасу стійкості при основному сполученні навантажень складає 1,30, а при аварійному – 1,25. Навантаження і впливи, прийняті для розрахунків стійкості схилу, відповідають вимогам нормативних документів [9, 10].

Розрахунки стійкості схилу виконані в плоскій постановці, методами Янбу [11] та Бішопа [12] за фіксованими кривими ковзання. Ці методи відносяться до групи методів відсіків, що засновані на аналізі граничної рівноваги. Зсувне тіло розбивається вертикальними відсіками на окремі стовпчики, кожен з яких вважається абсолютно твердим тілом і спирається на дугу, яка апроксимується прямою лінією.

За методом Янбу для визначення коефіцієнта запасу стійкості використовується рівняння рівноваги горизонтальних проекцій сил. При цьому рівняння рівноваги моментів не виконується. Коефіцієнт запасу стійкості  $k_{st}$  розраховується за залежністю (1):

$$k_{st} = \frac{\sum (c_i \cdot l_i + N_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i) \cdot \cos \alpha_i}{\sum N_i \cdot \sin \alpha_i}, \quad (1)$$

де  $c_i$  – питоме зчеплення в основі виділеного відсіку, кН/м<sup>2</sup>;

$l_i$  – довжина площини ковзання виділеного відсіку, м;

$\varphi_i$  – кут внутрішнього тертя ґрунту в основі виділеного відсіку, град;

$\alpha_i$  – кут площини ковзання виділеного відсіку, град;

$N_i$  – сила, що визначається за формулою (2).

$$N_i = \frac{k_{st} \cdot G_i - c_i \cdot l_i \cdot \sin \alpha_i}{k_{st} \cdot \cos \alpha_i + \sin \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i}, \quad (2)$$

де  $G_i$  – вага виділеного відсіку, кН.

Метод Бішопа заснований на рівновазі моментів. Коефіцієнт запасу стійкості  $k_{st}$  визначається як відношення моменту утримуючих сил до моменту зсувних сил щодо центру обертання за формулою (3):

$$k_{st} = \frac{\sum \left( \frac{c_i \cdot b_i + G_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i}{\cos \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i}{k_{st}}} \right)}{\sum G_i \cdot \sin \alpha_i}, \quad (3)$$

де  $c_i$  – питоме зчеплення в основі виділеного відсіку, кН/м<sup>2</sup>;

$b_i$  – ширина виділеного відсіку, м;

$G_i$  – вага виділеного відсіку, кН;

$\varphi_i$  – кут внутрішнього тертя ґрунту в основі виділеного відсіку, град;

$\alpha_i$  – кут площини ковзання виділеного відсіку, град.

В розрахункових схемах враховувались фізико-механічні характеристики ґрунтів, сили гідродинамічного впливу ґрунтового потоку, сейсмічний вплив інтенсивністю 7 балів. Результати розрахунків загальної стійкості схилу за трьома розрахунковими створами представлені в таблиці 1. Загальний вид зсувного тіла для розрізу 2-2 наведений на рис. 3.

Таблиця 1 – Значення мінімальних коефіцієнтів загальної стійкості

Інженерно-геологічний розріз	Розрахункові значення коефіцієнтів запасу стійкості, $k_{st}$			
	основне поєднання навантажень		аварійне поєднання навантажень	
	метод Бішопа	метод Янбу	метод Бішопа	метод Янбу
1-1	1,145	1,159	0,963	0,979
2-2	1,038	1,057	0,896	0,912
3-3	1,161	1,175	0,973	0,986

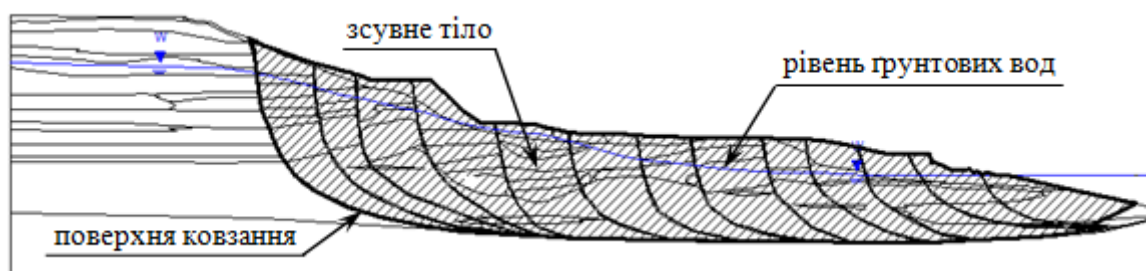


Рис. 3. Загальний вид зсувного тіла (розрахунковий розріз 2-2)

За отриманими результатами розрахунків стійкості схилу відмічено, що загальна стійкість схилу не забезпечена для всіх інженерно-геологічних розрізів. Мінімальний коефіцієнт запасу стійкості при основному поєднанні навантажень дорівнює  $k_{st} = 1,038$  (розріз 2-2), що менше нормативного значення  $k_{sn} = 1,30$ . Коефіцієнт запасу стійкості для аварійного поєднання навантажень складає  $k_{st} = 0,896$ , при нормативному значенні  $k_{sn} = 1,25$ . Ґрунтовий масив знаходиться в стані нестійкої рівноваги. Вплив природних або техногенних факторів може призвести не тільки до локальних деформацій, а й до зрушення всієї зсувної товщі.

Враховуючи складність інженерно-геологічної будови ділянки схилу та незатухаючі повільно текучі деформації ґрунтового масиву, розрахунки стійкості виконувались також в тривимірній постановці. Розрахунки в тривимірній постановці дають більш точні результати. Це пояснюється тим, що при побудові розрахункової схеми, враховуються комбінації інженерно-геологічних умов всього схилу, особливості топографії, наявність підрізування схилу, ярів, існуючих будівель та споруд. Важливою перевагою просторової оцінки стійкості схилів є те, що такий розрахунок дозволяє прогнозувати розвиток зсувного процесу не тільки по довжині інженерно-геологічного розрізу ґрунтового масиву, але і в плані [7].

Оцінка стійкості схилу в тривимірній постановці виконана в ліцензійному програмному комплексі Midas GTS NX. Тривимірний розрахунковий масив створено за трьома інженерно-геологічними розрізами. Розрахунки напружено-деформованого стану схилу виконувались методом скінчених елементів, з визначенням коефіцієнту запасу стійкості методом редукції. Поведінка ґрунту в розрахунковій схемі описувалась пружно-пластичною моделлю Мора-Кулона. В розрахунках була врахована топографія схилу, різномірність ґрунтів, зміна рівня ґрунтових вод по всій довжині схилу, прийняті протизсувні заходи. Загальний вид тривимірної розрахункової схеми існуючого схилу представлений на рис. 4.

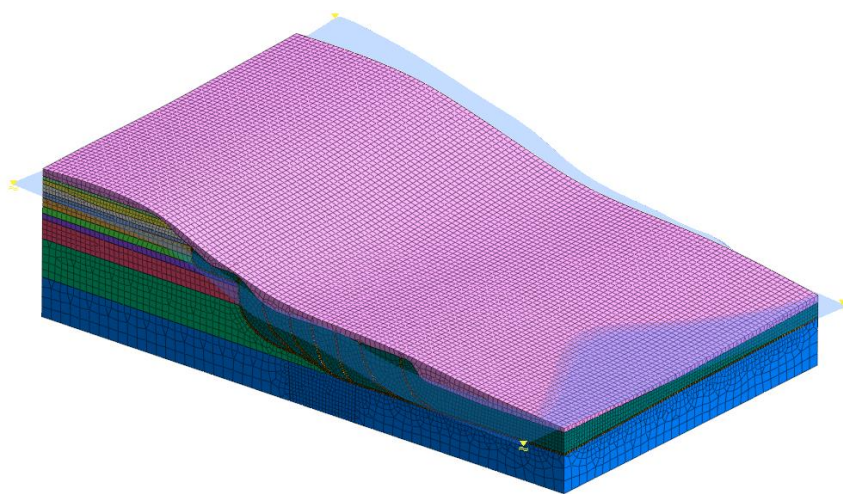


Рис. 4. Загальний вид тривимірної розрахункової схеми схилу (природний стан)

В результаті розрахунку напружено-деформованого стану схилу, були отримані зони максимальних дотичних напружень (рис. 5) по ґрунту порушеної структури (міцнісні характеристики ґрунту визначені, як «плашка по плашці») і значення коефіцієнта запасу стійкості, отриманого методом редукції.

Розрахунковий коефіцієнт запасу стійкості схилу при основному поєднанні навантажень становить  $k_{st} = 1,014$ , при нормативному значенні  $k_{sn} = 1,30$ . Загальна стійкість схилу не забезпечена, схил знаходиться в стані нестійкої рівноваги.

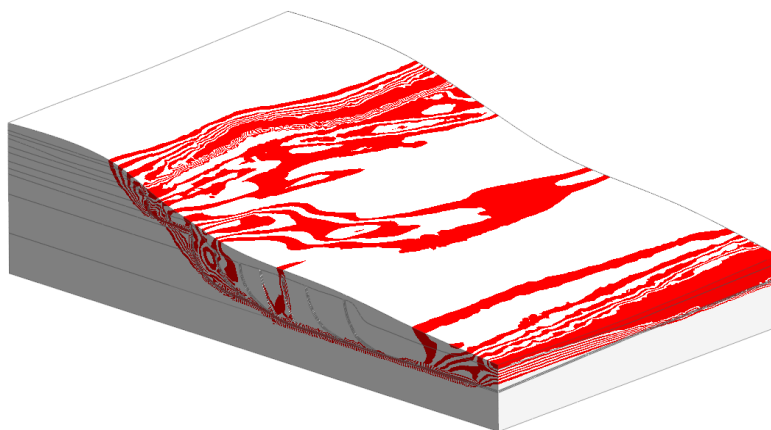


Рис. 5. Зони максимальних дотичних напружень схилу (природний стан)

З ціллю стабілізації зсувних процесів на ділянці схилу пропонується комплекс протизсувних заходів, що включає: влаштування поглинаючих свердловин; влаштування верхнього та нижнього ярусів паль-шпонок з вертикальним дренажем над ними; організоване відведення зливових вод з поверхні схилу; планування та кріплення поверхні схилу.

В роботі запропоновано влаштування на плато дренажної системи, що включає 14 поглинаючих свердловин (рис. 6). Поглинаючі свердловини мають діаметр прийомної частини 800 мм, яка заповнюється дренажним матеріалом. Крок свердловин дорівнює 14 м. Приймочна частина свердловин розташована в четвертинних лесових ґрунтах (ІГЕ-3÷ІГЕ-6). Потужність шарів, які перетинаються свердловинами, становить 15,5÷16,0 м.

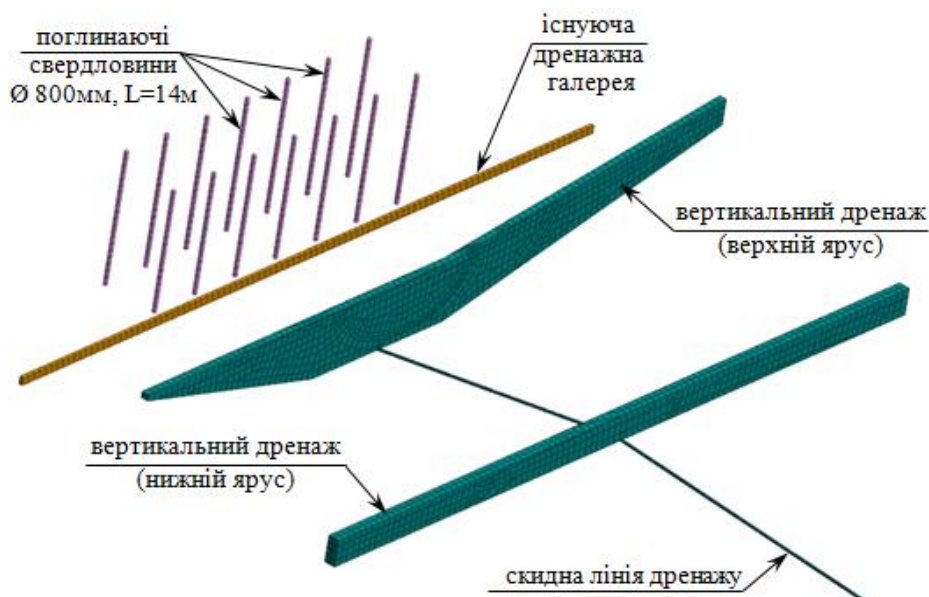


Рис. 6. Загальний вид дренажної системи

Скидання фільтраційних вод здійснюється в шар ІГЕ-11 (вапняк тріщинуватий) для якого коефіцієнт фільтрації в розрахунковій схемі прийнятий 30 м/добу. Призначення дренажної системи полягає в переведенні вод четвертинних відкладень в понтичний ярус, що представлений вапняками. В понтичному горизонті підземні води перехоплюються існуючою дренажною галереєю, що розташована уздовж бровки схилу. Відведення води з галереї здійснюється за допомогою штольні №1 у море.

На бермах схилу передбачено влаштування верхнього і нижнього ярусів утримуючих конструкцій (рис. 7, 8). Нижній ярус утримуючої споруди представлений двома рядами паль-шпонок Ø 1020 мм. Позначка забою паль (-23,6 м) визначалась виходячи з положення лінії

ковзання зсуву з фізико-механічними характеристиками ґрунту порушеної структури, а також внутрішніх зусиль, що виникають в елементах на цій позначці. Відмітка верху паль-шпонок визначалась з умови неможливості «переповзання» ґрунту над спорудою, і становить -2,6 м. На верхньому ярусі також передбачено влаштування двох рядів паль-шпонок. Позначка забою паль верхнього ярусу змінюється від -17,5 м до +3,5 м. Довжина паль-шпонок постійна і складає 21,0 м. Палі-шпонки обох ярусів розташовуються кроком 2,0 м в шаховому порядку, відстань між рядами також складає 2,0 м. Поверху паль виконана зворотна засипка свердловин крупним піском для влаштування вертикального дренажу.

Вертикальний дренаж представляє собою систему свердловин  $\varnothing 1020$  мм, що заповнені дренажним матеріалом (крупним піском). На зовнішній поверхні свердловин, по периметру, розміщується захисний шар з геотекстиля. Свердловини між собою об'єднані горизонтальною дренажною трубою  $\varnothing 250$  мм в обмотці з геотекстиля. Установка горизонтальної дрени виконується методом горизонтального спрямованого буріння [13].

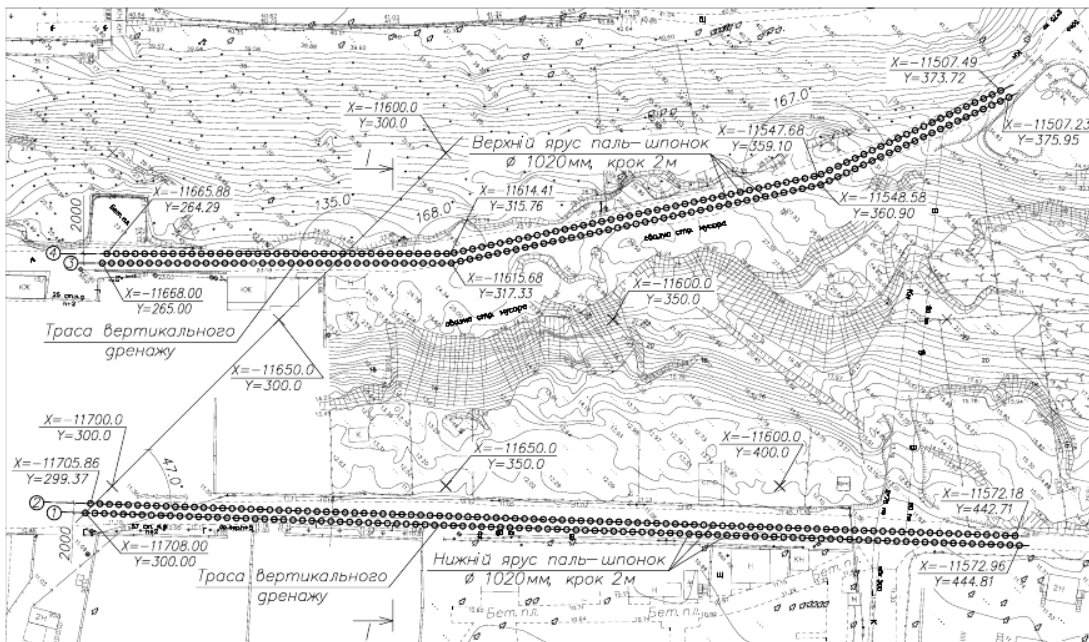


Рис. 7. План розташування утримуючих паль-шпонок

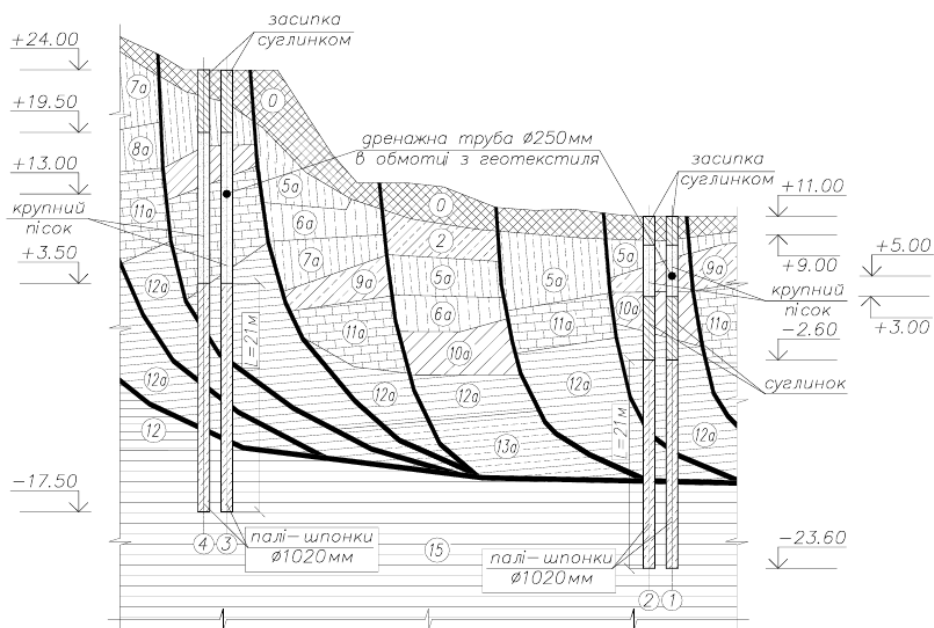


Рис. 8. Розріз I-I

На схилі, що розглядається, можливе застосування тільки такої конструкції вертикального дренажу. Влаштування будь-якої іншої системи дренажу, що пов'язана з виконанням земляних робіт при створенні траншеї, призведе до зростання зсувної небезпеки.

Фільтраційні розрахунки проводились з урахуванням трьох рівнів підземних вод. Перші два знаходяться в четвертинних відкладеннях, третій на підшві понтичного ярусу. Результатом фільтраційних розрахунків є положення кривих депресій на плато та в зсувних накопиченнях (рис. 9а, б).

Таким чином, в результаті влаштування системи дренажу (поглинаючих свердловин на плато і вертикального дренажу над палями-шпонками на схилі), спостерігається значний спад кривої депресії на плато та зсувних накопиченнях. На плато зниження рівня ґрунтових вод досягає 4 м, в зсувних накопиченнях рівень води падає до 2,0÷2,5 м. По мірі руху фільтраційного потоку до моря, дія дренажу буде зменшуватись за рахунок бічного притоку води з обох сторін не дренажного схилу. Зниження рівня ґрунтових вод на плато призведе до зниження лінії депресії у зсувних накопиченнях на схилі, що підвищить ступінь його стійкості.

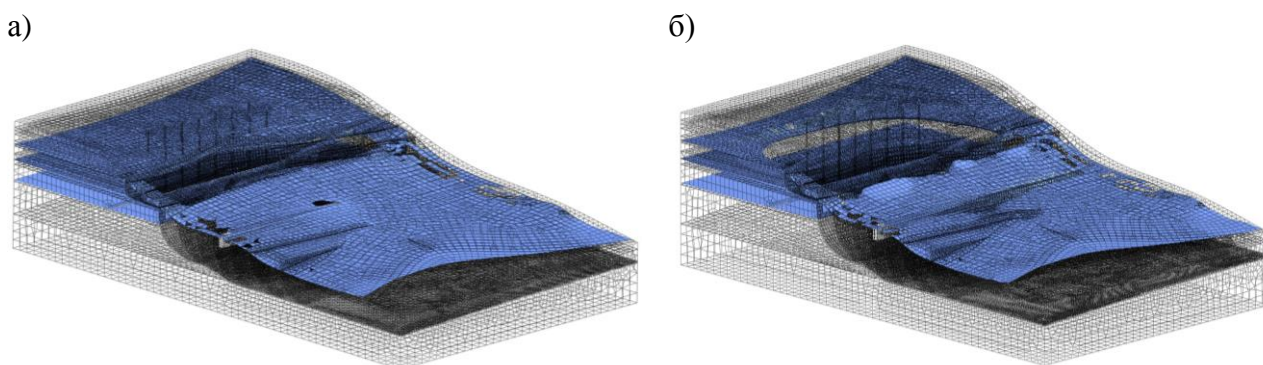


Рис. 9. Положення рівнів ґрунтових вод:

а – природний рівень ґрунтових вод; б – рівень ґрунтових вод після влаштування системи дренажу

Захист схилу від ерозійних процесів здійснюється шляхом організованого відведення зливових і талих вод, а також кріплення поверхні схилу. перехоплення і організоване відведення зливових вод з поверхні схилу здійснюється шляхом влаштування нових та реконструкції існуючих лотків. Лінія існуючого лотка, що розташована по вул. Вітрова продовжується до підпірної стінки для перехоплення води з верхньої частини схилу. Друга лінія лотків розташована у підніжжя схилу. Скидання води з лотків здійснюється у море.

Поверхня схилу кріпиться георешіткою типу ГР-30/10. Кріплення встановлюється по шару гравійно-піщаної суміші товщиною 50 мм і геотекстиля щільністю не менше 120 г/м<sup>2</sup>. Секції георешітки заповнюються родючим ґрунтом, з подальшим посівом багаторічних трав. В нижній частині укосу, в якості упорної частини, використовується матрац Рено розмірами 6,0×2,0×0,17 м.

Розрахунки стійкості схилу в тривимірній постановці також були проведені з урахуванням запропонованого комплексу протизсувних заходів. Мінімальний розрахунковий коефіцієнт запасу стійкості схилу при основному поєднанні навантажень становить  $k_{st}=1,315$ , при нормативному значенні  $k_{sn}=1,30$ . Коефіцієнт запасу стійкості при аварійному поєднанні навантажень складає  $k_{st}=1,268$ , при нормативному значенні  $k_{sn}=1,25$ . Аналізуючи результати розрахунків, можна зробити висновок, що загальна стійкість схилу забезпечена. Прийнятий комплекс протизсувних заходів в значній мірі збільшує загальну стійкість схилу.

**Висновки.** За результатами натурального обстеження та виконаних розрахунків стійкості зсувного схилу зроблені наступні висновки:

1. Загальна стійкість схилу для розрізу 1-1, при основному сполученні навантажень, не забезпечена з мінімальним коефіцієнтом запасу стійкості  $k_{st} = 1,145$ , при нормативному значенні  $k_{sn} = 1,30$ . Коефіцієнт запасу стійкості для аварійного сполучення навантажень складає  $k_{st} = 0,963$ , при нормативному значенні  $k_{sn} = 1,25$ .

2. Загальна стійкість схилу для розрізу 2-2, при основному сполученні навантажень, не забезпечена з мінімальним коефіцієнтом запасу стійкості  $k_{st} = 1,038$ , при нормативному значенні  $k_{sn} = 1,30$ . Коефіцієнт запасу стійкості для аварійного сполучення навантажень складає  $k_{st} = 0,896$ , при нормативному значенні  $k_{sn} = 1,25$ .

3. Загальна стійкість схилу для розрізу 3-3, при основному сполученні навантажень, не забезпечена з мінімальним коефіцієнтом запасу стійкості  $k_{st} = 1,161$ , при нормативному значенні  $k_{sn} = 1,30$ . Коефіцієнт запасу стійкості для аварійного сполучення навантажень складає  $k_{st} = 0,973$ , при нормативному значенні  $k_{sn} = 1,25$ .

4. Загальна стійкість схилу в тривимірній постановці, при основному сполученні навантажень, не забезпечена з мінімальним коефіцієнтом запасу стійкості  $k_{st} = 1,014$ , при нормативному значенні  $k_{sn} = 1,30$ .

5. Отримані результати свідчать про те, що схил знаходиться в стані нестійкої рівноваги. Вплив природних або техногенних факторів може призвести не тільки до локальних деформацій, а й до зрушення всієї зсувної товщі. Для забезпечення нормативної стійкості схилу необхідно передбачити комплекс протизсувних заходів.

6. Після обробки результатів натурального обстеження схилу було відмічено, що на зсувному схилі відбуваються незатухаючі повільно текучі деформації, що пов'язані з блоковою будовою схилу, гідрогеологічними умовами, а також реологічними властивостями меотичних глин.

7. З ціллю стабілізації зсувних процесів, запропоновано комплекс протизсувних заходів, що включає: влаштування поглинаючих свердловин; влаштування верхнього та нижнього ярусів паль-шпонок з вертикальним дренажем над ними; організоване відведення зливових вод з поверхні схилу; планування та кріплення поверхні схилу.

8. Влаштування системи дренажу приведе до зниження рівня ґрунтових вод на плато та у зсувних накопиченнях на схилі, що підвищить ступінь його стійкості.

9. Загальна стійкість схилу (в тривимірній постановці), з урахуванням запропонованого комплексу протизсувних заходів, забезпечена. Мінімальний розрахунковий коефіцієнт запасу стійкості схилу при основному поєднанні навантажень становить  $k_{st} = 1,315$ , при аварійному поєднанні навантажень  $k_{st} = 1,268$ . Прийнятий комплекс протизсувних заходів в значній мірі збільшує загальну стійкість схилу.

### Література

1. Черкез Є.А., Козлова Т.В., Шмуратко В.І. Інженерна геодинаміка зсувних схилів Одеського узбережжя після здійснення протизсувних заходів. *Вісник Одеського національного університету. Серія географ. та геол. наук.* 2013. Т.18, Вип. 1(17). С. 15-24.

2. Черкез Є.А., Чуйко О.Е., Орлов В.Ф. Кінематичні особливості геодформаційних процесів території порту Южний. *Вісник Одеського національного університету. Серія географ. та геол. наук.* 2006. Т.11, Вип. 3. С. 240-250.

3. Черкез Є.А., Драгомирецька О.В., Біч Г.М. Гідрогеомеханічні особливості формування зсувів випору північно-західного узбережжя Чорного моря. *Вісник Одеського національного університету. Серія геологічні науки.* 2003. Т.8, Вип. 5. С. 180-187.

4. Гришин В.А., Дорофєєв В.С., Мартинов Г.А. Розрахунок схилів Одеського узбережжя. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури.* 2010. Вип. 38. С. 184-194.

5. Гришин В.А., Дорофєєв В.С. Розрахунок протизсувних споруд: монографія. Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2009. 215 с.

6. Гришин В.А., Снісаренко В.І. Одеські схили і зсуви: монографія. Київ: МП "Леся", 2008. 300 с.
7. Великий Д.І. Стійкість ґрунтових споруд з урахуванням просторового ефекту: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Одеса, 2021. 171 с.
8. ДСТУ-Н В.1.1-37:2016. Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. [Чинний від 01.04.2016]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 94 с.
9. ДБН В 1.1-46:2017. Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення. [Чинні від 01.11.2017]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2017. 43 с.
10. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України. [Чинні від 01.10.2014] Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 110с.
11. Janbu N. Slope stability computation. *Embankment–Dam Engineering*. Casagtande volume. 1973. P. 47-86.
12. Bishop A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique*. 1955. № 5. P. 7-17.
13. Дренажна система на зсувних схилах : пат. 153788 Україна : МПК E02B 11/00 (2023.01). № u 202203445 ; заявл. 19.09.2022 ; опубл. 30.08.2023, Бюл. № 35.

### References

- [1] Ye.A. Cherkez, T.V. Kozlova, V.I. Shmuratko, "Inzhenerna heodynamika zsuвnykh skhylyv Odeskoho uzberzhzhia pislia zdiisnennia protyzsuвnykh zakhodiv", *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu. Seriiа heohraf. ta heol. nauk*. T.18, vol. 1(17), pp. 15-24, 2013.
- [2] Ye.A. Cherkez, O.E. Chuiko, V.F. Orlov, "Kinematychni osoblyvosti heodeformatsiinykh protsesiv terytorii portu Yuzhnyi", *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu. Seriiа heohraf. ta heol. nauk.* T.11, vol. 3, pp. 240-250, 2006.
- [3] Ye.A. Cherkez, O.V. Drahomyretska, H.M. Bich, "Hidroheomekhanichni osoblyvosti formuvannia zsuвiv vyporu pivnichno-zakhidnoho uzberzhzhia Chornoho moria", *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu. Seriiа heolohichni nauky*. T.8, vol. 5, pp. 180-187, 2003.
- [4] V.A. Hryshyn, V.S. Dorofieiev, H.A. Martynov, "Rozrakhunok skhylyv Odeskoho uzberzhzhia", *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, vol. 38, pp. 184-194, 2010.
- [5] V.A. Hryshyn, V.S. Dorofieiev, *Rozrakhunok protyzsuвnykh sporud: monohrafiia*. Odesa: Zovnishreklamservis, 2009.
- [6] V.A. Hryshyn, V.I. Snisarenko, *Odeski skhyly i zsuvy: monohrafiia*. Kyiv: MP "Lesia", 2008.
- [7] D.I. Velykiy, *Stijkist ґруntovih sporud z urahuvannyam prostorovogo efektu: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.23.01*. Odesa, 2021.
- [8] DSTU-N V.1.1-37:2016. Nastanova shodo inzhenernogo zahistu teritorij, budivel i sporud vid zsuвiv ta obvaliv. Kiyiv: DP «UkrNDNC», 2017.
- [9] DBN V 1.1-46:2017. Inzhenernij zahist teritorij, budivel i sporud vid zsuвiv ta obvaliv. Osnovni polozhennya. Kiyiv: Minregionbud Ukrayini, 2017.
- [10] DBN V.1.1-12:2014. Budivnictvo u sejsmichnih rajonah Ukrayini. Kiyiv: Minregionbud Ukrayini, 2014.
- [11] N. Janbu, *Slope stability computation. Embankment–Dam Engineering*. Casagtande volume. 1973. P. 47-86.
- [12] A.W. Bishop, "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", *Géotechnique*, no. 5, pp. 7-17, 1955.
- [13] Drenazhna systema na zsuвnykh skhylyakh : пат. 153788 Ukraina : МПК E02V 11/00 (2023.01). № u 202203445 ; zaiavl. 19.09.2022 ; opubl. 30.08.2023, Biul. № 35.

**ANTI-LANDSLIDE MEASURES OF THE SECTION OF THE SLOPE  
OF THE ODESSA COAST**

<sup>1</sup>**Osadchy V.S.**, PhD., Assistant Professor,  
ovs1455@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8153-8635

<sup>1</sup>**Anisimov K.I.**, Assistant Professor,  
anisimov@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0447-3927

<sup>1</sup>**Baadzhi V.G.**, Assistant,  
baadzhi@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6974-9082

<sup>1</sup>**Velykyi D.I.**, PhD,  
denislusuj@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1452-6742

<sup>1</sup>*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
4, Didrichson street, Odessa, 65029, Ukraine

**Abstract.** Calculations of the stability of the section of the landslide slope of the Odesa coast were performed in the work. The site is located in the Kyiv district of Odessa and is adjacent to the children's health and sports camp "Viktorija". The territory covers the coastal part of the plateau, the terraced slope and the beach area. Artificially created terraces and berms stand out in the relief of the slope, at the foot of the slope in some places a preserved natural beach.

The specifics of this area are complex engineering-geological (block structure of the slope, loess subsidence soils) and hydrogeological (several aquifers, high level of groundwater) conditions. Previously, before the implementation of a complex of anti-slide measures, large-scale deep sliding and squeezing landslides took place in this area. The partially implemented engineering protection measures, which consisted in the planning of the slope surface and the arrangement of shore fortifications, did not lead to a complete stabilization of the landslide processes.

At the present time, undamped, slow-flowing deformations occur on the landslide slope. These deformations are related to the blocky structure of the slope, hydrogeological conditions, as well as rheological properties of meotic clays. Stabilization of landslide processes is possible only with a comprehensive approach in the appointment of anti-slide measures.

The assessment of the stability of the slope and the appointment of anti-slide measures were carried out taking into account the features of the engineering and geological structure, hydrogeological conditions, as well as the results of the field survey of the slope. Calculations of the stability of the slope were carried out according to flat schemes by the methods of Bishop and Janbu. Calculations were also carried out in a three-dimensional setting using the finite element method in the Midas GTS NX geotechnical software complex. The Mohr-Coulomb elastic-plastic model described the behavior of the soil in the calculation scheme.

The proposed set of anti-slide measures, which includes: installation of absorption wells on the plateau, to lower the groundwater level; arrangement of the lower and upper tiers of key piles with vertical drainage above them; organized removal of stormwater from the surface of the slope; planning and fastening of the slope surface.

**Keywords:** slope, landslide, calculation scheme, coefficient of stability reserve, anti-slide measures, pile-key, drainage.

Стаття надійшла до редакції 28.05.2024

METHODS OF RENOVATION OF MULTI-STORY RESIDENTIAL BUILDINGS IN  
MODERN UKRAINE

<sup>1</sup>Aleynikova A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
alevtynaal222@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2486-4263

<sup>1</sup>Hulievskiy P., PhD,  
gulevskiyp@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4164-2101

<sup>2</sup>Orobei V.,  
viktor-orobej@ukr.net, ORCID: 0009-0001-9152-0188

<sup>1</sup>*O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine*  
St. Marshala Bazhanov, 17, Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup>*PJSC «TRUST ZHYTLOBUD-1»*,  
St. 43 Alchevskikh St., Kharkiv, 61002, Ukraine

**Abstract.** The current situation in Ukraine shows that the restoration of multi-story residential buildings is one of the most important problems of society. Existing research is mostly focused on assessing the technical condition of buildings to extend their service life or repair damage caused by uneven settlement of foundations and other operational factors. Since high-rise reinforced concrete buildings for residential and public purposes were usually designed and built without taking into account possible loads from military conflicts, as well as due to the lack of practical experience in their restoration and strengthening, the issue of ensuring their operational suitability and restoration is very relevant. To the stages of the building operation process, as a single technological process, in the event of damage with: inspections, monitoring, planned, unplanned and major repairs and liquidation. The article analyzed the current state of damaged multi-story buildings, studied the accumulated experience of their inspection, and considered constructive and technological measures for their restoration and reconstruction. The structural features of panel houses make it impossible to replace destroyed or severely damaged structures with new factory elements due to the lack of technical access for installation. The most optimal solution is the construction of new structures on the site of destroyed ones using rolled profiles, reinforcement, monolithic concrete, bricks and aerated concrete blocks. Taking this into account, the perspective for further research is a more detailed study of the problem and the development of structural and technological solutions for the restoration of residential buildings with economic justification of the feasibility of their implementation. In addition, there is a need to supplement the current regulatory documents regarding the reconstruction of buildings damaged as a result of military conflicts.

**Keywords:** multi-storey residential buildings, reconstruction, inspection, restoration methods, major repairs.

**Introduction.** Military action leads to damage and destruction of a huge number of buildings and structures on the territory of Ukraine, in particular, residential buildings. Since panel construction was widely used in the 1960s-1980s and coincided with the mass industrial construction of housing, the number of such houses is huge. Accordingly, the number of damaged panel houses (both in relative and absolute terms) is also significant (Fig. 1). The structural solutions of such buildings and the long period of their operation (60 years) determine a number of peculiarities when performing their on-site inspection, researching the properties of construction materials, the spatial location and damage of individual structures, as well as establishing the technical condition, developing emergency measures and technical solutions for strengthening the load-bearing structures.

In modern Ukraine, high-rise buildings made of reinforced concrete for residential and public purposes are often designed and built without taking into account possible loads that may arise as a result of military conflicts. This led to limited information about possible damage to load-bearing structures and lack of practical experience in their restoration and strengthening.



Fig. 1. Damaged multi-story residential buildings in the city of Kharkiv

Replacement and strengthening of individual load-bearing structures of panel houses with I and II categories of damage according to [1] makes it possible to quickly restore their operational suitability. But determining their technical condition, developing technical solutions and working drawings for reinforcement can take several months. The main reasons for the significant duration of this complex of works are: restrictions on access to structures (the need for initial inspection by explosives technicians, dismantling of destroyed structures, manufacture (in some cases) and installation of temporary supports and fasteners), conducting a full-scale visual and instrumental inspection of damaged structures, and, actually, time for the development and coordination of project solutions both with expert organizations (at the stage of examination of project documentation) and contracting organizations (regarding the availability of materials and equipment for procurement) [2].

**Analysis of recent researches and publications.** The work of scientists I.V. Shumakov [3-5], O.V. Samorodov [6, 7], O.V. Starkova [8, 9], D.O. Bondarenko [8, 9], and O.S. Molodeda [10-12] and others is devoted to issues of increasing the efficiency of restoration works of residential buildings and structures. Since multi-story reinforced concrete buildings for residential and public purposes were usually designed and built without taking into account possible loads from military conflicts, as well as due to a lack of practical experience in their restoration and strengthening, there are almost no publications in the domestic literature on the examination of buildings damaged during hostilities and the development of technical solutions for their restoration and ensuring operational suitability. Existing studies usually focus on assessing the technical condition of buildings in order to extend their service life or repair damage caused by uneven settlement of foundations and other causes.

**The purpose and objectives of the research.** The purpose of the study is to solve the problems associated with the restoration of multi-storey buildings in recent years during the military conflict, it is necessary to consider and analyze the current state of damaged buildings, analyze the accumulated experience in inspecting such buildings, as well as a review of constructive and technological measures for restoration and reconstruction.

**The main part.** The decision regarding the need to repair or strengthen building structures in order to restore or increase their bearing capacity and operational technical suitability is made on the basis of data obtained during their inspection, engineering investigations, as well as taking into account the results of verification calculations performed in accordance with the relevant regulatory documents.

It is recommended to choose a method of repair or strengthening on the basis of a technical and economic comparison of project solutions, taking into account further changes in operating costs.

The decision to strengthen structures is recommended after it has been established that other methods of ensuring reliability, such as the redistribution of technological loads, the use of effective materials for coatings and enclosing structures, the use of temporary unloading elements and means necessary for the installation and dismantling of equipment, are impossible or impractical.

To the stages of the building operation process, as a single technological process, in the event of damage with: inspections, monitoring, planned, unplanned and major repairs and liquidation. Based on the monitoring results, decisions are made on: continuation of operation; increasing monitoring volumes to identify the causes of the defect; elimination of the cause of the defect; development and implementation of measures to restore operational suitability.

Repair works of buildings and structures, depending on the condition of the supporting and enclosing structures, are divided into two types:

- ongoing repair (for normal and satisfactory condition);
- major repairs (for the condition of buildings (structures) or individual structures that are unsuitable for normal operation).

Summarizing the results of the survey conducted by the researchers of residential buildings, in particular panel high-rise buildings, damaged during hostilities, makes it possible to identify five main types of damage to load-bearing structures. In some cases, the restoration of damage to the filling of panel joints and surface damage to the outer layer of wall panels can be performed during current building repairs. Significant damage to load-bearing structures, such as: mechanical damage to panels as a result of hitting neighboring structures or the impact of a blast wave; mechanical damage to panels as a result of direct ammunition hits; mechanical damage to the panels as a result of fire, are subject to restoration only during capital repairs of panel houses or their individual parts.

Capital repair of buildings and structures can be comprehensive, covering the building or structure as a whole, or selective, consisting of the repair of individual structures of the building, structure or a separate type of engineering equipment.

Selective overhaul is carried out:

- if the complex repair of the building can cause serious obstacles in the work of the enterprise;
- with heavy wear of individual structures;
- when it is not economically feasible to carry out complex capital repairs.

Current, capital repairs and reconstruction must be carried out in compliance with the current rules of production organization and acceptance of repair and construction works, labor protection and fire safety rules.

Capital repair of buildings and structures includes such works, in the process of which replacement and strengthening of worn structures and parts of buildings and structures is carried out or their replacement with more progressive and economical ones that improve the operational capabilities of objects, with the exception of complete replacement or replacement of main structures, which have the longest service life (stone and concrete foundations, all types of building walls, all types of wall frames, underground network pipes, bridge supports, etc.). An example list of overhaul works is given in Table 1.

Table 1 – An exemplary list of works on capital repair of buildings and structures

№	Process	Characteristic
1	Foundations	Replacing wooden chairs or replacing them with stone or concrete pillars; partial relocation (up to 10%), as well as strengthening of stone foundations and basement walls, which is not related to the superstructure of the building or additional loads from the supplied equipment; restoration of vertical and horizontal insulation of foundations; restoration of the existing paving around the building (more than 20% of the total area of paving).
2	Walls and columns	Filling of cracks with clearing of furrows, with tying of seams to the old masonry; arrangement and repair of structures that strengthen stone walls; repositioning of old brick cornices, jumpers of parapets of pits and projecting parts of walls; relocation and repair of individual old sections of stone walls (up to 20% of the total volume of masonry), which are not related to the superstructure of the building or additional loads from the supplied equipment; reinforcement of reinforced concrete and stone columns with clips; repair and partial replacement (up to 20% of the total volume) of columns not related to additional loads from the installed equipment; replacement of fillers in walls with a stone, reinforced concrete and metal frame (up to 40%); replacement of old crowns of log or block walls (up to 20% of the total wall surface); solid construction of walls made of logs and beams; partial replacement of claddings, backfills and plate insulation of frame walls (up to 50% of the total area of the walls); replacement or repair of cladding and insulation of wooden plinths; repair of stone plinths of wooden walls with their relocation up to 50% of the total volume; installation of new and replacement of worn wall clamps made of logs and beams.
3	Partitions	Repair, change and replacement of all types of worn partitions with more progressive designs; in the case of capital repair of partitions, partial re-planning with an increase in the total area of partitions up to 20% is allowed.
4	Roofs and coverings	Replacement of old roof trusses or their replacement with prefabricated reinforced concrete; total or partial replacement of beams, crossbars, purlins; total or partial replacement of old metal and reinforced concrete trusses, as well as replacement of metal with prefabricated reinforced concrete trusses; reinforcement of trusses when replacing types of covering, when hanging lifting devices, as well as when corrosion of nodes and other elements of metal and reinforced concrete trusses; partial or total replacement of steps, mauerlats and scaffolding; partial or complete replacement of old covering elements, as well as replacing them with more progressive and durable ones; partial (more than 20% of the total roof area) or total change or replacement of all roof elements;
5	Interfloor ceilings and floors	Repair or replacement of floor coverings; replacement of individual structures or ceilings as a whole with more progressive and durable structures; reinforcement of all types of inter-floor and attic floors; partial (more than 10% of the total floor area in the building) or total replacement of all types of flooring and its base; refurbishing the floor during repair with replacement for stronger and more durable materials.
6	Windows, doors	Complete replacement of old window and door blocks, as well as gates of production buildings; replacement and strengthening of all types of stairs and their individual elements.

7	Internal plastering, facing and painting works	Restoration of plaster of all premises and repair of plaster in the amount of more than 10% of the total area of plastered surfaces; replacement of wall coverings in the amount of more than 10% of the total area of covered surfaces; general anti-corrosion painting of metal structures.
8	Facades	Repair and restoration of facing with an area of more than 10% of the facing surface; full or partial (more than 10%) plaster restoration; complete restoration of beams, eaves, belts, sandriks, etc.; restoration of moldings; general painting with stable mixtures; cleaning facades with sandblasting devices; replacement of balcony slabs and fences; replacement of the covering of protruding parts of the building.
9	Central heating	Replacement of individual sections and assemblies of heating boilers, boilers, boiler units or complete replacement of boiler units; repair and replacement of expanders, condensation pots and other network equipment; repair and relocation of foundations for boilers; automation of boiler houses; replacement of heating registers; connection of buildings to the heating network (when the distance from the building to the network is no more than 100 m).
10	Ventilation	Partial or complete replacement of air ducts; replacement of fans; rewinding and replacement of electric motors; replacement of shutters, deflectors, throttle valves, blinds; partial or complete replacement of ventilation boxes; replacement of radiators; replacement of heating units; replacement of filters; replacement of cyclones; replacement of individual camera structures.
11	Water supply and sewerage	Partial or complete replacement of the pipeline in the middle of the building, including water supply inlets and sewage outlets; partial or complete replacement of pipeline insulation; replacement of parts or complete replacement of pumping units of pumping systems; repair and replacement of pressure tanks.
12	Hot water supply	Replacement of coils and boilers; replacement of the pipeline, parts and in general pump units, tanks and pipeline insulation.
13	Electric lighting and communication	Replacement of worn parts of the network (more than 10%); replacement of safety shields; repair and restoration of cable channels; replacement of lamps with other types is permitted during network overhaul.

During the restoration of Ukraine's independence, large-panel construction began to lose popularity. It is not technically possible to manufacture separate prefabricated elements for most of the series of panel houses in operation. In addition, the cost of such elements, including logistics, becomes unacceptably high. The structural feature of panel houses is such that it is almost impossible to replace a destroyed or severely damaged structure with a factory-made element for objective reasons, namely: lack of access for installation. In view of the above, the most expedient solution is the manufacture of separate structures to replace the destroyed ones on the spot using rolled profiles, reinforcement, concrete, bricks and aerated concrete blocks (Fig. 2). In some cases, it is possible to use prefabricated reinforced concrete elements, for example, floor slabs.

In modern Ukraine, high-rise reinforced concrete buildings for residential and public needs are often designed and built without taking into account possible loads that may arise as a result of military conflicts. This leads to insufficient information about the nature of damage to load-bearing structures and the lack of practical experience in their restoration and strengthening.



Fig. 2. Restoration of damaged multi-storey residential buildings in the city of Kharkiv

Studies of damaged buildings show that the stiffness of the entire building may be sufficient, but that individual parts such as shells and floors are significantly damaged. For the restoration of such buildings, the use of metal structures for reinforcement and the use of monolithic reinforced concrete structures that are reliably connected to the surviving elements are recommended.

Monolithic reinforced concrete structures, which are made using tunnel formwork, can be effective, which increases the overall rigidity of the building and strengthens local damage zones. A detailed examination of the building using modern equipment to determine its technical condition and strength of individual elements also plays an important role.

A general list of recommendations on structural, technological and theoretical calculation measures will help to significantly increase the reliability and safety of operation of damaged buildings and structures.

**Conclusions and directions for future research.** So, as a result, an analysis of the current state of damaged multi-story buildings, an analysis of the accumulated experience of surveying such buildings, and a review of constructive and technological measures for restoration and reconstruction were carried out. Analysis of surveys of damaged buildings allows us to conclude that such buildings

are subject to restoration only with major repairs or their individual parts. The structural feature of panel houses does not allow replacement of a destroyed or severely damaged structure with a new factory-made element due to the lack of technical access for installation. In this context, it is necessary to review the parameters of sections and reinforcement in order to increase them. For example, for ceilings and other elements of buildings, it is recommended to increase the thickness of reinforced concrete slabs to at least 250 mm and increase the percentage of reinforcement to at least 2.5%. Also worth considering is the need for protective shelters similar to those used in Israel, Iran and other Middle Eastern countries. The most expedient solution is the construction of separate structures to replace those destroyed on the spot using rolled profiles, reinforcement, monolithic concrete, bricks and aerated concrete blocks. In this regard, the prospect for further research is a more detailed examination of the problem and the development of constructive and technological solutions for the restoration of residential buildings. Also, it should be noted that there is a need to supplement the current normative documents on the reconstruction of buildings damaged as a result of military conflicts.

### References

- [1] Methodology for conducting inspections and documenting its results. Approved by the Order of the Ministry of Community and Territorial Development of Ukraine dated August 6, no. 144, 2022.
- [2] Yu.S. Sliusarenko, Yu.B. Melashenko, Yu.I. Ishchenko, Ye.O. Pavliuk, "Dosvid obstezhennia panelnykh budynkiv, poshkodzhennykh vnaslidok boiovykh dii", *Nauka ta budivnytstvo*, no. 2(36), pp. 41-50, 2023. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2023-5>
- [3] I.V. Shumakov, *Prohnozuvannia ratsionalnykh parametriv orhanizatsii ta tekhnolohii zvedennia pidzemnykh chastyn tsyvilnykh budivel*, Zhurfond, 2022.
- [4] I. Shumakov, M. Saliia, R. Mikautadze, Y. Fursov, "On the issue of constraints in the construction of underground parts of civil buildings", *Ways to Improve Construction Efficiency*, no. 1(39), pp. 3-8, 2019. <https://doi.org/10.32347/2707-501x.2019.39.3-8>
- [5] I. Lyakhov, I. Shumakov, A. Ubyivovk, A. Kupreichyk, "Experimental laboratory tests of piles with a polymer casing under the action of additional loading friction forces from soil subsidence", *AIP Conference Proceedings*, no. 2490 (1), 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0124577>
- [6] O. Samorodov, O. Tabachnikov, S. Yesakova, S. Krotov, "Experience in Designing and Calculating Slab Foundations of a Two-Section Multi-story Building on Weak Water-Saturated Soils", *Best Practices in Geotechnical and Pavement Engineering*, no. 449, pp. 33-43, 2024. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-8505-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-99-8505-0_4)
- [7] O. Samorodov, R. Goodary, O. Krotov, I. Khrapatova, "High-Performance Solid Raft Foundations with Bottom Cutouts for Lightweight Tower Structures", *Geotechnical and Geological Engineering*, no. 42, pp. 2439-2447, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02683-3>
- [8] T. Kostyuk, A. Plugin, O. Starkova, D. Bondarenko, O. Borziak, "Software tools for development of a methodology for selecting construction materials according to their performance characteristics", *AIP Conference Proceedings*, no. 2684 (1), 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0120109>
- [9] O. Borziak, D. Plugin, O. Starkova, D. Bondarenko, "A rust converter based on plant components for restoration work", *AIP Conference Proceedings*, no. 2490 (1), 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0122703>
- [10] O. Molodid, N. Sharykina, R. Plokhuta, I. Musiiaka, "Research of restoration technology of the clear cover of reinforced concrete structures", *技術學刊*, no. 38 (4), pp. 243-251, 2023. <https://www.airitilibrary.com/Article/Detail/10123407-N202312210014-00001>
- [11] O. Galinsky, O. Molodid, N. Sharikina, R. Plokhuta, "Research of Technologies for Restoration of the Concrete Protective Layer of Reinforced Concrete Constructions During the Reconstruction of the Buildings and Structures", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, no. 907, 012056, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/907/1/012056>

- [12] O. Molodid, R. Plokhuta, I. Musiiaka, I. Reznichenko, "Sealing joints between concrete elements with polyurethane material", *AIP Conference Proceedings*, no. 2684 (1), 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0120368>
- [13] DSTU B V.3.1-2:2016. Remont i pidsylennia nesuchykh i ohorodzhivalnykh budivelnnykh konstruktsii ta osnov budivel i sporud. Kyiv: Minregionbud, 2016.
- [14] DBN V.1.2-14:2018. Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud. Kyiv: Minrehionbud ta ZhKH Ukrainy, 2018.
- [15] DBN V.2.2-24: 2009. Proektuvannia vysotnykh zhytlovykh i hromadskykh budynkiv. Kyiv: Minrehionbud ta ZhKH Ukrainy, 2009.

## МЕТОДИ ВІДНОВЛЕННЯ БАГАТОПОВЕРХОВИХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ В СУЧАСНІЙ УКРАЇНІ

<sup>1</sup>Алейнікова А.І., д.т.н, доцент,  
alevtynaal222@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2486-4263

<sup>1</sup>Гулевський П.Ю., к.т.н.,  
gulevskiy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4164-2101

<sup>2</sup>Оробей В.В.,  
victor-orobej@ukr.net, ORCID: 0009-0001-9152-0188

<sup>1</sup>Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова  
вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, 61002, Україна

<sup>2</sup>АТ «Трест Житлобуд-1»,  
вул. Алчевських, 43, м. Харків, 61002, Україна

**Анотація.** Сучасна ситуація в Україні свідчить про те, що відновлення багатоповерхових житлових будинків є однією з найважливіших проблем суспільства. Наявні дослідження здебільшого зосереджені на оцінці технічного стану будівель для продовження терміну їх експлуатації або усунення пошкоджень, спричинених нерівномірним осіданням фундаментів та іншими експлуатаційними факторами. Оскільки багатоповерхові залізобетонні будівлі житлового та громадського призначення зазвичай проектувалися та будувалися без урахування можливих навантажень від воєнних конфліктів, а також через відсутність практичного досвіду з їх відновлення та посилення, питання забезпечення їхньої експлуатаційної придатності та відновлення є дуже актуальним. До етапів процесу експлуатації будівлі, як єдиного технологічного процесу, при пошкодженні є: обстеження, моніторинг, плановий, позаплановий і капітальний ремонт та ліквідація. У статті було проведено аналіз поточного стану пошкоджених багатоповерхових будівель, вивчено накопичений досвід їх обстеження та розглянуто конструктивно-технологічні заходи для їх відновлення та реконструкції. Конструктивні особливості панельних будинків унеможливають заміну зруйнованих або сильно пошкоджених конструкцій новими заводськими елементами через відсутність технічної можливості доступу для монтажу. Найбільш оптимальним рішенням є зведення нових конструкцій на місці зруйнованих з використанням прокатних профілів, арматури, монолітного бетону, цегли та газобетонних блоків. Враховуючи це, перспективою для подальших досліджень є детальніше вивчення проблеми та розробка конструктивно-технологічних рішень для відновлення житлових будівель з економічним обґрунтуванням доцільності їх впровадження. Крім того, існує потреба у доповненні чинних нормативних документів щодо реконструкції будівель, пошкоджених внаслідок воєнних конфліктів.

**Ключові слова:** багатоповерхові будинки, реконструкція, обстеження, методи відновлення, капітальний ремонт.

Стаття надійшла до редакції 30.05.2024

**ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING THE INTEGRITY OF INSULATED FACADES OF HOUSES AND SEARCH FOR METHODS OF THEIR REPAIR**

<sup>1</sup>**Babii I.**, Ph.D., Associate Professor,  
igor7617@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8650-1751

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

<sup>1</sup>**Chernov I.**, Ph.D., Assistant Professor,  
chernov.i.s@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8787-1006

<sup>1</sup>**Pysarchuk N.**, student,  
npisarchuk007@ukr.net@gmail.com, ORCID: 0009-0000-5646-1613

<sup>1</sup>*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
4, Didrichson street, Odessa, 65029, Ukraine

<sup>2</sup>**Kucherenko L.**, Ph.D., Associate Professor,  
liliya13liliya13@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0348-3610

<sup>2</sup>*Vinnitsia National Technical University*  
95 Khmelnytsky Highway, Vinnitsia, 21021, Ukraine

**Abstract.** In modern construction, after the insulation of facades over time, the next stage is necessary – their repair. Repair of insulated facades preserves and increases the operational efficiency of thermal insulation systems of facades, ensures durability and improves the appearance of the building.

Research results indicate the importance of correct installation and maintenance of insulated facades at the initial stages of construction. It was found that at this stage, various defects can occur, which negatively affect their thermal insulation efficiency and overall reliability during operation. Defects in the installation of insulating materials and other factors can reduce the effectiveness of insulation.

The work examines various aspects of the repair, such as replacement of thermal insulation layers, replacement of damaged components and restoration of the appearance of the facade. One of the key tasks is the restoration of the thermal insulation layer, which may be damaged as a result of mechanical or other influences. It is important to inspect in detail, determine the degree of damage and, if necessary, replace insulating materials that may lose their thermal insulation properties in the future.

In addition, the restoration of the outer finish layer is the part of the process of repairing insulated facades to ensure an attractive appearance of the building and to protect the internal structural layers, especially the thermal insulation material, from climatic and other factors. It was established that over time, different materials of the thermal insulation layer have different indicators of destruction. Particular attention should be paid to the selection of system materials that have similar vapor permeability properties. This approach will help ensure the necessary properties of the thermal insulation system and keep the appearance of the building in perfect condition for a long period of operation.

It has been established that after the restoration of isolated facades, it is important to take care of their maintenance. Properly performing regular inspection and maintenance will help detect possible problems in a timely manner and prevent serious damage in the future. Climate and local building standards must also be taken into account when selecting repair materials to ensure optimal facade performance.

In the process of research, it was found that repair methods are chosen, first of all, based on the technical condition of the building and the degree of damage obtained as a result of the survey. This allows you to choose the appropriate repair methods and assess the associated risks. It should be noted that a specialist who carefully examines and determines the state of facade insulation must have certain competencies in the arrangement and repair of facades.

Therefore, the research results emphasize the importance of quality repair and maintenance of insulated facades to ensure their reliability, efficiency and durability.

It was found that in order to ensure the quality and safety of construction objects, it is important to carry out systematic repair and maintenance of insulated facades, which can be damaged due to various influences. This allows you to preserve the building's energy efficiency and maintain its aesthetic appearance over a long period of operation.

**Keywords:** insulated façade, defects, causes, façade repair, restoration.

**Introduction.** In the modern construction industry, the issues of energy efficiency and heat conservation are becoming more and more relevant. One of the key aspects in this context is the repair of insulated facades, which plays an important role in providing comfortable living conditions, reducing heating costs and increasing the service life of buildings.

However, the repair of insulated facades requires not only technical knowledge and skills, but also the right organizational and technological approach. The ability to choose the best solutions at each stage of the renovation process, taking into account the characteristics of the building, the nature of the damage and the available technologies, is critical for achieving a successful outcome.

This paper examines various aspects of the organization and technological process of repair of insulated facades with plaster finishing. We will consider the selection of optimal materials and technologies, methods for diagnosing and assessing the condition of the façade, as well as effective strategies for planning and executing repair work.

**Analysis of the latest research and publications.** Repair of insulated facades is an important component of the construction process, since the preservation of the thermal characteristics of the building and its appearance depends on its quality. There are a number of key aspects to consider when renovating. Firstly, it is the restoration of the existing insulation layer, which can be damaged due to mechanical or natural influences. In addition, it is important to check and, if necessary, replace insulation materials that have lost their properties over time. Also the repair tasks include the restoration of exterior decoration, which provides not only an aesthetic appearance, but also protection of structures from the influence of negative environmental factors. When repairing insulated facades, it is also important to take into account the choice of materials and technologies that will be most effective in the specific operating conditions of the building [1, 2]. For example, in an area with high humidity, it may be necessary to use water-repellent materials to prevent mold and mildew from forming. It is also important to consider using energy-efficient materials that will help reduce energy consumption for space heating [3, 4]. High-quality repairs allow you to maintain the thermal insulation characteristics of the façade, ensuring the comfort and efficiency of the building. After the completion of the renovation work, it is also important to ensure systematic maintenance and support of the façade in order to avoid problems in the future and ensure a long service life of the building [5-8].

**The purpose of the work** is to determine the factors affecting the destruction of facades, the methods of repair, and how to correctly organize and perform the repair of an insulated facade with maximum efficiency.

**Materials and methods.** System analysis and statistical studies were used.

**Main material and results.** It is known that problems or deficiencies in the building structure or the construction process are detected already at the very beginning of the project or in the first stages of construction. This can be the result of improper design, insufficient attention to the quality of materials, or incorrect work. Detecting defects at an early stage allows you to take timely measures to correct them, which protects against further problems and ensures the quality and reliability of the building or structure and their compliance with current regulations requirements, Table 1.

There are many factors that affect insulated facades during operation. Let's consider the main problems that may arise with the façade of the building during operation:

Damage from weather conditions.

1. Wind action: Insulated facades tend to be less consistent with wind action compared to traditional facades due to the presence of thick insulation. However, strong winds can still destroy

or damage the outer layer, especially if the installation has not been done properly or if the materials used are not strong enough (Figure 1).

Table 1 – Occurrence of disorders at the initial stage

№№ p/n	Type of violations	Recommended parameters for the arrangement of facades with insulation
1.	Violation of temperature standards when performing work	The work should be carried out in accordance with the requirements of current regulatory documents and flow charts. For example, insulation only in warm weather, without sudden temperature changes, or use heat shields under such conditions.
2.	Violation of air humidity standards when performing work	Work should take place at constant moisture levels. It is not recommended to work in high humidity or in direct sunlight on the façade [2, 7, 9].
3.	Unprepared façade	The façade should be even, free of dirt and paint, and have good adhesion properties. Irregularities should be leveled with plaster mortar, and surface differences should not exceed the requirements of the standards.
4.	Use of low-quality materials	It will lead to defects during the installation of facades. For example, cracking of the reinforcing layer, damage to the mechanical fastening of the insulation, namely plate dowels, etc.
5.	Non-compliance with coating technology	All technological operations must be performed in a strict sequence in compliance with all technological requirements. The reinforcing waterproof layer is a plaster that is laid on the façade together with the mesh. It protects the insulation from water and ultraviolet radiation and is the basis of high-quality insulation. The insulation should not be left open, because polystyrene foam is destroyed under the influence of ultraviolet radiation, and mineral wool loses its properties with prolonged exposure to moisture [7, 9].
6.	Wrong organizational decisions.	Low productivity and quality of work.



Fig. 1. Destruction of the façade under the influence of wind

2. Exposure to moisture. Insulated facades must have a proper waterproofing layer to avoid moisture penetration into the structure. It is known that moisture that gets inside the insulation can lead to a decrease in its insulation properties and contribute to the formation of mold or rot [10].

3. Thermocyclic changes. Thermocyclic changes can also affect insulated facades. The expansion and contraction of materials can lead to tearing or discoloration of the outer layer. In addition, uneven temperature changes can cause peeling or deformation of the façade coating layers.

4. Improper maintenance:

– Inadequate cleaning: The accumulation of dust, dirt and other contaminants on the surface of the façade can lead to various types of damage. Dust and dirt can alter the appearance of the façade, including yellowing or staining. In addition, some types of dirt may contain harmful substances that can damage the surface of the material or accelerate its wear.

– Inadequate upkeep: A lack of regular maintenance and monitoring can lead to a buildup of problems that can become serious later on. For example, deficiencies in sealing, replacement of worn parts, or repairs not detected and repaired in a timely manner can lead to increased damage and repair costs in the future. Also, inadequate maintenance can include ignoring proper cleaning and protection procedures, which can also lead to accelerated wear and tear of materials and the appearance of defects.

5. Design problems. Incorrect installation: Incorrect fastening or arrangement of the layers of the thermal insulation system can cause serious problems. For example, if there were missing mesh scarves in the reinforcing layer in the corners of the openings, structural deformation, facade panels or other facing materials were not properly fixed to the base of the building, this could lead to their cracking or peeling over time. Also, incorrect installation can cause deformation of materials or violation of their integrity (Figure 2).

6. Ventilation Problems: Inadequate ventilation can lead to condensation inside the walls. If the humidity cannot dissipate properly, it can cause mold, rot, or corrosion to form in the structure of the building. Insulated walls can be the most vulnerable to this, where the insulation layer can trap moisture inside if the ventilation system is not working properly.

7. Chemical factors:

– Interaction with contaminants: Exposure to atmospheric gases, smog, acid rain and other contaminants can lead to depreciation of the façade surface. For example, nitrogen and sulfur oxides found in automotive emissions and industrial emissions can react with the surface of building materials, leading to contamination, yellowing, and loss of aesthetic appearance [11, 12]. In addition, soot, fungi and other biological contaminants can also alter the appearance of the façade and cause damage.

– Exposure to chemicals: Chemical reactions between façade materials and other substances can cause damage to them. For example, contact between acid and metal elements can cause corrosion and destruction of the surface. Also, chemical reactions can occur when any building materials come into contact with aggressive substances, such as solvents or acids, which can lead to their destruction or degradation.

8. Aging of materials.

Fracture due to time: Even if materials have been selected and installed correctly, time can cause them to break down and lose performance. For example, natural factors such as UV radiation, temperature fluctuations, precipitation, etc., can cause materials to damage and lose their strength and elasticity over time. This is especially true for organic materials such as wood or polymeric materials.

9. Destruction of facades as a result of military aggression.

The most common may be damage to the façade after fragments and shrapnel, when the upper plaster and reinforcing layer is completely affected. If the house is insulated, before starting to repair such defects, it is important to check how firmly and reliably the insulation adheres to the surface of the wall. First of all, the plaster and reinforcing layers suffer from the impact of the explosion – they lag behind the surface. In this case, you need to completely dismantle them so that moisture does not get under the system (Figure 3).



Fig. 2. Damaged insulated façade with cracks

To prevent and solve these problems, it is important to carry out regular technical inspection of the façade, take maintenance and repair measures, as well as choose high-quality materials for construction and cladding. Regular examinations allow you to identify problems in the early stages and avoid their further exacerbation. Maintenance, such as cleaning, painting, or repairing local damage, helps keep the façade in good condition and extend its lifespan. Additionally, using high-quality and age-resistant materials can reduce the risk of rapid wear and tear and help ensure the long-term life of the building.



Fig. 3. Damage to the façade from debris and shrapnel

Table 2 is presented below, which contains information about various defects that may occur on the façade of the building. For each defect, a description of its impact on the condition of the façade is provided and a method for solving the problem is proposed. This may include technical inspection, maintenance, repair or replacement of damaged parts, and the application of preventive measures. Such a table will make it easy to identify problems and determine the necessary actions to solve them.

Table 2 – Defects that may occur on the insulated façade [7]

No.№ p/n	Defect	Reason	Solving the problem
1.	Cracks on the decorative layer	This can be caused by improper arrangement of the technological system, for example, there are no expansion joints, temperature changes that lead to expansion or contraction of the material.	For small cracks, you can use special aggregates or sealants for insulation materials. For larger cracks, it may be necessary to replace the affected areas of the material layer, use a reinforced layer or repair kits.
2.	Moisture retention	Incorrect selection of materials for the thermal insulation system. That is, materials with different vapor permeability properties are used. Also, insufficient sealing can contribute to moisture retention inside the structure, which can cause a violation of the properties of thermal insulation materials, and, as a result, peeling, damage to the structure or the formation of mold on the inner surface.	Find the source of moisture formation and eliminate it. If necessary, check and repair any leaks or damage to the decorative layer. The use of waterproofing materials. It may be necessary to replace the affected areas of the material layer or dismantle the decorative or reinforced layers.
3.	Condensation	Poor ventilation or inadequate insulation can lead to condensation forming inside the wall, which can lead to rot or other problems.	Check ventilation systems and make sure they are working properly. If necessary, install additional ventilation to ensure effective removal of moisture from the room. Increase the thickness of the insulation layer.
4.	Paint or plaster smudges	Poor quality paint or plaster, as well as incorrectly selected materials, can cause them to erode or peel off due to atmospheric conditions.	For local repair of damaged paint or plaster, restorative paints or plaster can be used, according to the type of surface. In case of serious damage, it may be necessary to partially or completely replace the paint or plaster.
5.	Appearance of mold or mildew	Moisture that builds up inside an insulated wall due to poor ventilation or leaks can contribute to the formation of mold or mildew, which can be harmful to health.	Remove mold or mildew with special cleaning and disinfecting products. Make sure that the cause of the mold has been eliminated, for example by fixing the leak or improving ventilation.
6.	Damage from mechanical stress	Insulated facades can be more vulnerable to impact or damage compared to traditional facades, as insulation systems are usually less durable.	For local damage, repair kits can be used or paint or plaster damage can be repaired. For more damage, partial or complete replacement of thermal insulation systems or cladding materials may be necessary.

Depending on the types of façade insulation, each of which has its own advantages and disadvantages, destruction from natural conditions may differ. So, for example, when using insulation material:

- mineral wool. The percentage of destruction is about 5-10% during, on average, 20 years of operation, depending on the density of the insulation and the type of protective and decorative materials. This means that, on average, over 20 years of operation, about 5-10% of insulation facades made of mineral wool may need to be repaired or replaced due to various reasons, such as wear, deformation or damage due to weather conditions or improper use [9]. However, With the correct selection of materials for the thermal insulation system, the period of effective operation of facades with plaster finishing is up to 28 years [13].

- polystyrene foam (PPS or EPS). The percentage of destruction is approximately 10-15% during 23 years of operation, depending on the density of the insulation and the type of materials of the protective and decorative layer. It is advisable to use in places with high rainfall. This means that insulated facades made of expanded polystyrene are more resistant to climatic conditions, but they are characterized by less environmental friendliness and fire resistance.

- extruded polystyrene (XPS) (rarely used for thermal insulation of facades). The percentage of destruction is approximately 2-3% over 20 years of operation. This means that insulated facades made of extruded polystyrene can show a similar level of problems as those used with mineral wool over a longer period of time.

These figures are general estimates and can vary depending on various factors such as material quality, installation quality, climatic conditions, and others.

Taking into account the above factors of façade damage, the next step is the choice of repair methods.

Choosing the appropriate repair option in each case has several requirements:

- repairs must be cost-effective;
- aesthetic requirements;
- the degree of various wear mechanisms;
- requirements for the service life of repairs;
- requirements for the reliability of repairs.

Depending on the degree and extent of damage:

- easy repair of the coating;
- patching and repair of the coating;
- removal and application of plaster;
- repair of the entire façade insulation system.

All requirements for choosing a repair method do not have the same meaning. Repair methods are selected primarily on the basis of the technical condition of the structure [14, 15]. The one that best meets the architectural and financial criteria of the project is selected, then selected from among those that meet the technical requirements. Figure 4 shows the principles of choosing a repair method.

Thus, it is established that repair methods are chosen, first of all, based on the technical condition of the building and the degree of damage, which is obtained as a result of the inspection of the condition. This allows you to choose the appropriate repair methods and assess the risks involved. It should be noted that a specialist who carefully examines and determines the condition of façade insulation must have certain competencies in the arrangement and repair of facades.

Thus, the results of the research emphasize the importance of high-quality repair and maintenance of insulated facades to ensure their reliability, efficiency and durability.

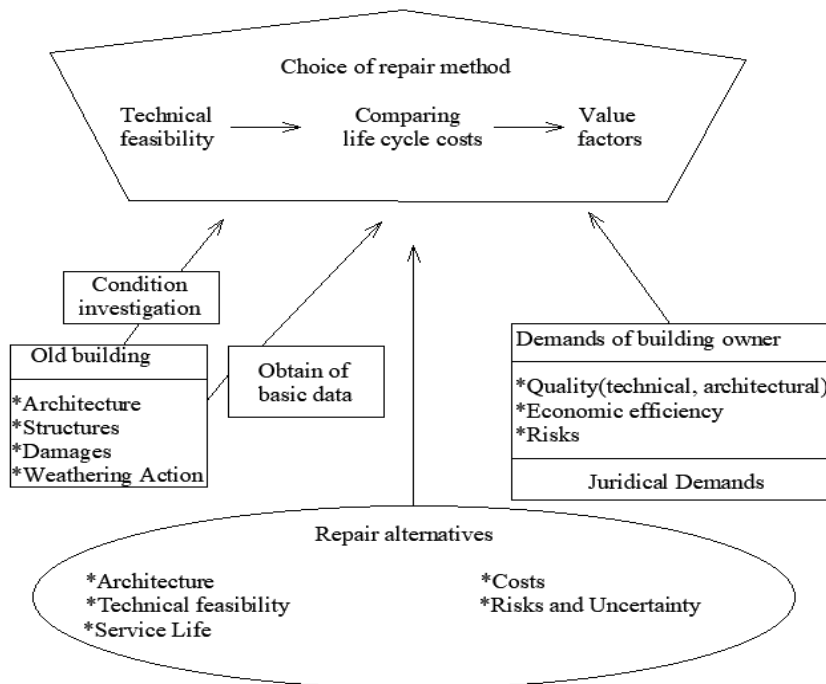


Fig. 4. Various factors influencing the decision on the method of repairing the thermal insulation of the façade

### Conclusions:

1. In modern construction, after the insulation of the facades, the next stage is necessary over time – their repair. Repair of insulated facades preserves and increases the operational efficiency of thermal insulation systems of facades, ensures durability and improves the appearance of the building.
2. Research results indicate the importance of correct installation and maintenance of insulated facades at the initial stages of construction. It was found that various defects may occur at this stage, which negatively affects their thermal insulation efficiency and overall reliability. Defects in the installation of insulating materials and other factors can reduce the effectiveness of insulation.
3. It was found that in order to ensure the quality and safety of construction objects, it is important to carry out systematic repair and maintenance of insulated facades, which can be damaged due to various influences. This allows you to preserve the energy efficiency of the building and maintain its aesthetic appearance over a long period of operation.
4. It was established that over time, different materials of the thermal insulation layer have different indicators of destruction.
5. It has been established that repair methods are chosen, first of all, based on the technical condition of the building and the degree of damage obtained as a result of the survey.

### References

- [1] O.V. Gayduk, T.M. Gerlyand, N.V. Kulalayeva, N.V. Pivtorats'ka, T.V. Pyatnichuk, *Tekhnologii utepleniya fasadov zdaniy: podruchnik*. Zhitomir: «Polissya», 2021.
- [2] O.I. Menevlyuk, I.M. Babiy, H.D. Bochorishvili, K.I. Bochevar, *Materialy ta tekhnolohiyi izolyatsiynykh robir v budivnytstvi*: monohrafiya. Odesa: Vydavnytstvo FOP Bondarenko M.O., 2020.
- [3] 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>.
- [4] A.D.R. Pontinha, J. Mäntyneva, P. Santos, L. Durães, "Thermomechanical performance assessment of sustainable buildings' insulating materials under accelerated ageing conditions", *Gels*, 9, 241, 2023. <https://doi.org/10.3390/gels9030241>.

- [5] I. Babii, L. Kucherenko, Yu. Sokolan, A. Zalagina, Sławomir Rabczak, "Comparative characteristics of modern technologies thermal insulation of the houses", *Architektury Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, 68, pp.17-25, 2021.
- [6] F. Dushan, N. Sathiskumar, R. Pathmanathan, "Research on technological progress and challenges of facade system for sustainable construction: current design practice", *Sustainability*, 15(19), 14319, 2023. <https://doi.org/10.3390/su151914319>.
- [7] V.G. Sokha, E.K. Karapuzov, *Utepleniye fasadov*. K.: Vishcha osvita, 2007.
- [8] G.S. Ratushnyak, O.G. Ratushnyak, *Upravleniye energosberegayushchimi proyektami termorenovatsii stroitel'stva: pervyy posibnik*. Vinnitsa: Universum-Vinnitsya, 2009.
- [9] 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»*, Volume 14, Issue 2, 801, 2024.
- [10] Elżbieta Stanaszek-Tomal, *The Problem of Biological Destruction of Façades of Insulated Buildings – Causes and Effects*, 2017.
- [11] Mokrii fasad – plyusi i minusi. [Online]. Available: <https://t1.ua/porady/40707-mokryy-fasad-plyusy-i-minusy.html>. Accessed on: May 19, 2024.
- [12] Jessica S. de Souza, Elton Bauer, *Study of damage distribution and intensity in regions of the façade*, 2016.
- [13] V.H. Sokha, E.K. Karapuzov, A.Y. Meneilyuk, Y.N. Babyu, "Dolhovechnost' system teplozolyatsyy yly vse-taky ékspluatatsyonnaya éfektyvnost'", *Budivel'ni materialy ta vyroby*, no. 2(67), pp. 33-34, 2011.
- [14] J. Lahdensivu, "Selection of repair methods for rendered façades", *Tampere University of Technology, Tampere, Finland*. [Online]. Available: <https://framcos.org/FraMCoS-6/21.pdf>. Accessed on: May 19, 2024.
- [15] Assis Neto P.C.d., Sales L.P.B., Oliveira P.K.S., Silva I.C.d., Barros I.M.d.S., Nóbrega A.F.d., Carneiro A.M.P., "Expanded Vermiculite: A short review about its production, characteristics, and effects on the properties of lightweight mortars", *Buildings*, 13, 823, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13030823>.

## АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЦІЛІСНІТЬ УТЕПЛЕНИХ ФАСАДІВ БУДІНКІВ ТА ПОШУК МЕТОДІВ ЇХ РЕМОНТУ

<sup>1</sup>Бабій І.М., к.т.н., доцент,  
igor7617@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8650-1751

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

<sup>1</sup>Чернов І.С., к.т.н., ст. викладач,  
chernov.i.s@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8787-1006

<sup>1</sup>Писарчук Н.С., студентка,  
npisarchuk007@ukr.net@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-5646-1613.

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

<sup>2</sup>Кучеренко Л.В., к.т.н., доцент,  
liliya13liliya13@gmail.com, ORCID 0000-0003-0348-3610

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет  
Хмельницьке шосе 95, м. Вінниця, 21021, Україна

**Анотація.** У сучасному будівництві після утеплення фасадів з плином часу необхідний наступний етап – їх ремонт. Ремонт утеплених фасадів зберігає та підвищує експлуатаційну ефективність систем теплоізоляції фасадів, забезпечує довговічність та поліпшує зовнішній вигляд будівлі.

Результати досліджень свідчать про важливість коректного улаштування та обслуговування утеплених фасадів на початкових етапах будівництва. Виявлено, що на цьому етапі можуть виникати різноманітні дефекти, які негативно впливають на їхню теплоізоляційну ефективність та загальну надійність при експлуатації. Недоліки у монтажі ізоляційних матеріалів та інші фактори можуть знизити ефективність утеплення.

В роботі досліджено різні сторони ремонту, такі як заміна теплоізоляційних шарів, заміна пошкоджених компонентів та відновлення зовнішнього виду фасаду. Одне з ключових завдань – це відновлення теплоізоляційного шару, який може постраждати в результаті механічних або інших впливів. Важливо детально оглянути, визначити ступінь ушкодження і, за потреби, замінити ізолюючі матеріали, які можуть втратити теплоізоляційні властивості в майбутньому.

Крім того, відновлення зовнішнього фінішного шару є частиною процесу ремонту утеплених фасадів, щоб забезпечити привабливий зовнішній вигляд будівлі та захистити внутрішні конструкційні шари, а особливо теплоізоляційний матеріал від кліматичних та інших факторів. Встановлено, що з плином часу різні матеріали теплоізоляційного шару мають різні показники руйнування. Особливу увагу слід приділити вибору матеріалів системи, що мають аналогічні властивості з паропроникності. Цей підхід допоможе забезпечити необхідні властивості системи теплоізоляції та зберегти зовнішній вигляд будівлі в ідеальному стані протягом тривалого періоду експлуатації.

Встановлено, що після відновлення ізольованих фасадів, важливо дбати про їх догляд і обслуговування. Належне виконання регулярної перевірки та обслуговування допоможе своєчасно виявляти можливі проблеми і запобігати серйозним ушкодженням у майбутньому. Необхідно також враховувати клімат і місцеві будівельні стандарти при виборі матеріалів для ремонту, щоб забезпечити оптимальну експлуатаційну ефективність фасаду.

В процесі дослідження виявлено, що методи ремонту обираються, в першу чергу, виходячи з технічного стану будівлі та ступеню пошкодження, яка отримана в результаті обстеження. Це дозволяє вибрати відповідні методи ремонту та оцінку пов'язаних з цим ризиків. Слід зауважити, що фахівець, який ретельно обстежує і визначає стан фасадного утеплення повинен володіти визначеними компетенціями в улаштуванні та ремонті фасадів.

Отже, результати досліджень підкреслюють важливість якісного ремонту та обслуговування утеплених фасадів для забезпечення їхньої надійності, ефективності та довговічності.

Виявлено, що для забезпечення якості та безпеки будівельних об'єктів важливо проводити систематичний ремонт та обслуговування утеплених фасадів, які можуть бути пошкодженими внаслідок різних впливів. Це дозволяє зберегти енергоефективність будівлі та підтримувати її естетичний вигляд на протязі тривалого часу експлуатації.

**Ключові слова:** утеплений фасад, дефекти, причини, ремонт фасадів, відновлення.

Стаття надійшла до редакції 5.06.2024

**АДГЕЗІЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЧАСТКОВОГО ТОРКРЕТУВАННЯ  
МОБІЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ**

<sup>1</sup>**Кирилюк С.В.**, к.т.н., доцент,  
kirilstani@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8871-8302

<sup>1</sup>**Чернов І.С.**, к.т.н., ст. викладач,  
chernov.i.s@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8787-1006

<sup>1</sup>**Кирилюк А.В.**, магістрант,  
kyryliukart@gmail.com, ORCID: 0009-0002-7209-2998

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

**Анотація.** В статті проаналізовані сучасні методи та матеріали, що застосовуються для ремонту та відновлення бетонних і залізобетонних елементів конструкцій будівель та споруд. Одним з таких є розглянутий метод торкретування, використання мокрого способу торкретування, його переваги та недоліки. Приведені дефекти, які виникають при виготовленні, зберіганні, транспортуванні, монтажу та при експлуатації бетонних і залізобетонних конструкцій. Розглянуте утворення різних типів тріщин, що виникають до процесу експлуатації та виникнення тріщин під час експлуатації конструкцій при центральному розтягу та вздовж однієї поверхні при ексцентричному розтягу. В роботі представлено регулювання технічних властивостей ремонтних сумішей. Воно досягається використанням спеціальних видів цементу, добавок і заповнювачів, особливих методів укладання та умов твердіння, а також відповідної підготовки поверхні старого бетону.

Дослідження спрямоване на визначення адгезії ремонтних сумішей, нанесених методом торкретування. Використовувалось часткове нанесення ремонтної суміші, за допомогою мобільної установки в лабораторних умовах, з метою визначення оптимальних технологічних параметрів набризку. Розроблено методику експериментальних досліджень визначення адгезії дрібнозернистого торкретбетону з використанням стандартизованих форм з модернізованими перегородками. Використовувались підготовлені половинки балочок з кутом поверхні 20°, як старий бетон, для збільшення площі контакту та зменшення завихрення при торкретуванні. Розроблено двухфакторний, дев'ятиточковий план експерименту, в якому варіювались: товщина шару дрібнозернистого торкретбетону (1 см, 2 см, 3 см) часткового нанесення та швидкість набризку торкретфіробетонної суміші (0 м/с, 35 м/с, 70 м/с). Проведено експериментальне дослідження та приведені його результати.

**Ключові слова:** ремонтні суміші, мобільна установка, адгезія, часткове торкретбетонування, планування експерименту.

**Вступ.** Безупинно розвивається сучасне будівництво: зведення, ремонт і реконструкція будівель та споруд. Роботи, які виконуються при ремонті та реконструкції, є складним завданням, що вимагає відповідних знань і навичок в області архітектури, будівництва та мережі інженерних комунікацій. Реконструкція будівельних об'єктів здійснюється за допомогою бетону та спеціальних бетонних сумішей.

За «часткове торкретування» в роботі прийнято не фінішне покриття, а лише шар для підвищення адгезії ремонтного бетону. Для поліпшення властивостей бетонних сумішей використовуються спеціальні добавки, які відповідають за стійкість матеріалу до різних впливів, у тому числі в роботі, за адгезію самого бетону, від чого залежить довговічність служби бетону.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Метод торкретування добре підходить для ремонту і реконструкції всіх бетонних і залізобетонних виробів (несучих колон, фундаментів, резервуарів, цегляних стін та балок). Метод торкретування зручний тим, що значно скорочує

трудомісткість, вартість і час виконання робіт, у порівнянні з традиційним методом бетонування та використання опалубки. Завдяки торкретуванню підвищується водонепроникність, механічна міцність і морозостійкість конструкцій. Технологія торкретування компактною мобільною установкою (рис. 1) ефективна при невеликих об'ємах робіт або при обмеженні робочого простору, де використання великогабаритного торкрет-обладнання технічно неможливе або економічно недоцільне.

Якщо традиційні, методи бетонування будівництва технічно неможливі або економічно недоцільні, слід використовувати спеціальні методи бетонування виконання робіт. Одним з таких методів є торкретування.

Торкретування – це нанесення шару бетону на поверхню залізобетонної конструкції під тиском стисненого повітря зі швидкістю 70-140 м/с, так званий спосіб безформового бетонування. Будівництво будівель і споруд – не тільки нове будівництво, але й комплекс будівельних робіт і організаційно-технічних заходів щодо зміни і поліпшення стану будівель і споруд, а також усунення недоліків.

Для розтягнутих залізобетонних елементів пошкодження, спричинене силою, – це звичайне розтріскування вздовж усіх сторін профілю при центральному розтягу та вздовж однієї поверхні при ексцентричному розтягу. Однак слід зазначити, що в елементах, які розтягуються, особливо в ненапружених елементах, при низьких навантаженнях спостерігаються тріщини, які є ознакою майбутнього руйнування. Якщо ширина розкриття тріщини перевищує гранично допустиме значення, тріщина вважається небезпечною для експлуатації. Ця умова також стосується елементів, що піддаються вигину. Також слід звернути увагу на попереднє напруження залізобетонних елементів. У практиці виготовлення та використання попередньо напружених конструкцій часто спостерігається, що зусилля попереднього напруження можуть пошкодити самі попередньо напружені конструкції [1].

До тріщин, що виникають до початку експлуатації, відносяться усадочні тріщини внаслідок порушення технологічного режиму твердіння бетону, технологічні тріщини в збірних залізобетонних елементах в процесі виробництва, технологічні тріщини в збірних залізобетонних елементах внаслідок порушення умов зберігання, транспортування та монтажу. Кількість дефектів з цих причини набагато більше і становить близько 60%. До причин виникнення тріщин під час експлуатації відносяться: температурні деформації, неправильне влаштування або відсутність температурних або компенсаційних швів, нерівномірне осідання фундаментів, холодні шви, аварійне просочування ґрунту, виїмка біля фундаменту, динамічні навантаження, пов'язані із забиванням паль, ущільнення ґрунту, близькість до доріг тощо, а також силові фактори на фундаменти, що перевищують гранично допустимі навантаження. Останнє зумовлено вищими навантаженнями при надбудові [2].

Технологія монолітного бетонування передбачає укладання при пластичності нижнього шару в момент заливки верхнього, що гарантує хорошу адгезію, рівномірний набір міцності і монолітність. Але реалізувати таку технологію вдається далеко не завжди. У випадках, коли уникнути цього неможливо, шви бетонування і місця їх розташування продумують заздалегідь. Бажано уникати можливості появи холодних швів, дотримуватися технології. Заборонено виконання таких стиків в конструкціях, де є зусилля на розтяг [3].

**Мета** представленої статті полягає у дослідженні адгезії ремонтних сумішей, нанесених мокрим способом торкретування, при використанні мобільної установки.

Задачами дослідження є виконання аналізу сучасних методів та матеріалів, що застосовуються для ремонту бетонних та залізобетонних елементів конструкцій будівель та споруд, для боротьби з холодними швами (у перспективі). Проведення експерименту з визначення адгезії дрібнозернистого торкретбетону при частковому торкретуванні.

**Матеріали та методика дослідження.** Найпопулярнішим способом зміцнення конструкцій є використання залізобетонних або металевих елементів. Основними передумовами для посилення є: пошкодження внаслідок воєнних дій, підвищені навантаження під час експлуатації (наприклад, зміна вантажопідйомності крана, нові матеріали або пофарбовані конструкції), помилки в проектуванні, виготовленні та монтажі

конструкції.

При зовнішньому армуванні колон використання двокомпонентних епоксидних клеїв має недоліки: високу вартість компонентів епоксидного клею, велику і нестабільну витрату клею, низьку термо- і морозостійкість і високу робочу міцність обладнання. Крім того, використання фібробетону та фіброармованих пластиків (так звані ФАП) для зовнішнього армування колон є дорогим і трудомістким для встановлення [4].

Недоліками цементних матеріалів є висока в'язкість, тривалий час схоплювання, низька міцність, низька адгезія до старого бетону і неможливість примусового ремонту тріщин. Вищевказані матеріали використовуються для закладення великих зовнішніх дефектів, а внутрішні дефекти (раковини, порожнечі) вимагають їх перетворення в зовнішні шляхом вирізання спеціальних отворів.

При виконанні ремонту цементними розчинами і бетонами в залежності від конкретних умов до них пред'являються специфічні вимоги: прискорення швидкості твердіння, уповільнення процесу схоплювання, можливість розрідження бетонної суміші (до 10 см ОК і більше), без усадки або розширення, висока щільність і хімічна стійкість, хороша адгезія до «старого» бетону. Регулювання технічних властивостей бетону досягається використанням спеціальних видів цементу, добавок і заповнювачів, особливих методів укладання та умов твердіння, а також відповідної підготовки поверхні старого бетону [5, 6].

Мокрий спосіб торкретування здійснювався мобільною торкрет-установкою (рис. 1), яка працює стисненим повітрям від пересувної компресорної станції необхідної потужності. Роботу установки малої потужності можна ефективно використовувати для влаштування та ремонту тонкостінних елементів будівель з бетону або залізобетону. Бункер-пістолет (так званий хопер) сконструйований за принципом компресорної форсунки і має об'єм бункера 6 дм<sup>3</sup>. При товщині покриття 10 мм, двома шарами, продуктивність пістолета становить близько 10 м<sup>2</sup>/год [7].



Рис. 1. Комплект мобільного торкретбетонування:

1 – бункер-пістолет; 2 – пересувний компресор; 3 – пневматичний шланг

Спосіб мокрого торкретування має багато переваг, у порівнянні з сухим способом, і є найсучаснішим високоефективним методом торкретування. Переваги мокрого методу торкретування полягають у наступному:

- відскок свіжого бетону може бути зменшений більш ніж вдвічі (до чотирьох разів);
- при торкретуванні не утворюється пил, що значно покращує умови праці оператора, який виконує операцію торкретування;
- при накачуванні свіжої бетонної суміші гідравлічним способом витрачається менше стисненого повітря;

– покращення якості торкретбетону, оскільки бетонна суміш є однорідною за складом і постійним водоцементним відношенням;

– можливість остаточної герметизації поверхні свіжого бетону.

Порівняно з сухим методом, мокрий метод торкретування бетону вимагає більшої роботи на початку (приготування та подача суміші в насос) і на завершенні (очищення обладнання). Крім того, метод мокрого торкретування має обмежений час використання підготовленої суміші, і якщо бетонну суміш не нанести протягом цього часу, суміш не можна використовувати.

Склад суміші для мокрого методу торкретування містить: цемент, інертні матеріали, добавки, рідину, волокна (металеві або базальтові волокна). До торкрет-бетонних сумішей у будівництві пред'являються такі ж вимоги, як і до звичайних бетонних сумішей. Показники придатності мокрих торкретбетонних сумішей:

- мінімальний вміст води;
- низьке водоцементне співвідношення;
- низький вміст цементу;
- рухливість суміші.

Набагато складніше досягти всіх вищевказаних вимог при мокрому торкретуванні. Особливо на відкритих будівельних майданчиках. Раніше це було абсолютно непрактично, а сьогодні наблизитися до ідеального складу суміші можна за допомогою спеціальних добавок і пластифікаторів.

Для суміші дуже важлива якість заповнювача. Важливу роль відіграє гранулометричний склад. Дуже важливим критерієм для торкретбетонних сумішей є кількість дрібних частинок, що складають основну масу складу, і характеристики міцності.

Не можна говорити про торкрет-бетонну суміш універсального складу, яка за своїм складом може використовуватися повсюдно. Це неможливо. У кожній місцевості свій склад торкретбетону з інертними матеріалами та різними характеристиками міцності. І набагато вигідніше використовувати місцеві заповнювачі, ніж доставляти їх з одного кар'єру по всій країні.

Існують добавки, які знижують водоцементне співвідношення, вони значно підвищують міцність шару. Поширеною практикою є використання прискорювачів тужавіння, особливо для великих шарів бетонних робіт. Введення таких добавок сприяє зниженню спікання суміші. При методі мокрого торкретування, добавка потрапляє в сопло і суміш перемішується під час польоту до поверхні для досягнення хорошого зчеплення з поверхнею. Однак для використання затверджувача необхідний додатковий пристрій – насос-дозатор. Це забезпечує регламентовану подачу добавок в суміш. Коштує таке обладнання недешево, але воно з лишком компенсує це за рахунок зменшення товщини шару покриття і відскоку матеріалу. Однак введення таких добавок призводить до зниження міцності суміші.

Слід звести до мінімуму використання прискорювачів тужавіння, а використання таких добавок повинно бути встановлено розробником проекту. Вартість розчину залежить від ряду факторів:

- вартість інертних заповнювачів;
- вартість доставки заповнювача на місце робіт;
- вартість використаних добавок і волокон;
- вартість виготовлення суміші [8].

Бетонні основи мають високу абсорбцію і поглинають більшу частину вологи з ремонтної суміші. Щоб штукатурка, плитка або ремонтна суміш не відшарувалися в перший рік, слід використовувати проникаючу ґрунтовку. Для прикладу розглянемо використання таких складів: Кнауф Бетоконтакт. В якості підготовки для якісної обробки бетонних і пінобетонних поверхонь використовується цей розчин. Такий розчин не проникає глибоко в основу і в більшості випадків проникає в поверхню на рівні 4-5 мм. Однак головною перевагою цього складу є те, що він створює високу адгезію на пористих поверхнях. Як тільки рідина висохне (12 годин), утворюється шорсткий шар, оздоблювальні матеріали відмінно зчіплюються [9].

Планування експерименту з визначення адгезії ремонтної суміші. Для перевірки адгезії дрібнозернистого торкретбетону використовували форму для балкових зразків  $4 \times 4 \times 16$  см і готових напівзразків у вигляді старого бетону. Ця форма є найбільш придатною для створення зразків дрібнозернистого торкретбетону для попередніх експериментів. Торці готових половин виконуються під кутом 20 градусів з урахуванням особливостей поведінки повітряного потоку в технології торкретування та збільшення площі контакту.

Для запобігання модифіковані вставки використовувалися для запобігання дефектам виготовлення в нижніх кутах, спричинених завихреннями стисненого повітря при торкретуванні.

Експериментальне укладання торкретбетону проводилось за допомогою компактною мобільної установки, яка складається з компресора та бункера. Мобільна установка дозволяє укладати з інтенсивним ущільненням торкрет-бетону в порожнину випробувальних форм шляхом мокрого торкретування.

**Результати досліджень.** Експериментальний план і рівні змінних параметрів [10] товщини дрібнозернистого торкрет-бетону підсумовані в таблиці 1. Зміни варіюються від 1 до 3 см торкрет-бетону та дрібнозернистого бетону, а швидкість течії торкрет-бетону суміші від 0 до 70 м/с.

Таблиця 1 – План експерименту та рівні параметрів показників міцності дрібнозернистого бетону

№	$x_1$	$x_2$	$X_1$	$X_2$	$Y_1$
			Товщина, см	Швидкість, м/с	Міцність на розтяг при вигині, кг/см <sup>2</sup>
1	-1	-1	1	0	46,2
2	-1	0	1	35	62,6
3	-1	1	1	70	72,3
4	0	-1	2	0	47,8
5	0	0	2	35	63,7
6	0	1	2	70	73,4
7	1	-1	3	0	48,1
8	1	0	3	35	64,2
9	1	1	3	70	74,1

В якості добавки використовувався пластифікатор на основі BauGut BauPLAST. Даний пластифікатор дозволяє підвищити рухливість бетону на кілька пунктів без зміни водоцементного співвідношення на користь води, що полегшує роботу з укладання дрібнозернистого бетону.

До складу дрібнозернистої торкретбетонної суміші додають фібру з базальтового волокна для підвищення її міцнісних властивостей. Для застосування базальтового волокна для мобільного торкретбетону, в якому використовувався бункерний пістолет з діаметром сопла 8 мм, його волокна розрізали на шматки 3-4 мм.

Випробувальні зразки виготовляли в стандартних формах для виготовлення зразків балок з дрібнозернистого бетону розмірами  $40 \times 40 \times 160$  мм (рис. 2). Форма для виготовлення зразків балок з дрібнозернистого бетону має наступні характеристики: тип форми – форма балки (ББ); кількість зразків – 3; ширина – 40 мм; довжина – 160 мм; висота – 40 мм [11].

Для випробувань дрібнозернистого торкретбетону в якості старого бетону, який ремонтують, використовували зразки напівбалок  $4 \times 4 \times 16$  см з торцем під кутом 20° до вертикалі. Також ця форма модифікована виготовленими перегородками з перфорацією для створення

зразків дрібнозернистого торкретбетону в лабораторних умовах з урахуванням використовуваного мобільного торкретбетонного обладнання.



Рис. 2. Форма з половинками зразка

Випробування міцності зразків на розтяг при вигині проводилося на установці МП-100. Коли зразок ламається, значення навантаження фіксується на циферблаті і його тільки залишається переписати і середнє значення в загальну таблицю 1.

Мінімальні значення міцності на розтяг при вигині вийшли у зразків з мінімальною товщиною і мінімальною швидкістю торкретування. Далі зі збільшенням швидкості торкретування збільшується міцність зразків на розтяг при згині. Збільшення товщині торкретування міцність зразків на розтяг при згині змінюється не значно, в межах похибки.

#### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

1. Описана в роботі підготовка поверхні старого бетону та використання ґрунтовок дає змогу покращити адгезію при ремонтних роботах.

2. Мобільну компакту установку для мокрого торкретбетону можливо використовувати для ремонтних робіт та створення адгезійного шару між старим на новим бетоном.

3. Використання теорії планування експерименту дозволило отримати адекватні результати дослідження, а саме визначити міцність на розтяг при вигині. Вона змінюється від 46,2 до 74,1 кг/см<sup>2</sup>.

Перспективним напрямком дослідження є використання часткового торкретування компактною мобільною установкою при влаштуванні холодних швів бетону.

#### **Література**

1. ДСТУ-Н Б В. 1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. [Чинний від 2017-04-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 44 с. (Національний стандарт України).

2. Парфентєва І.О., Верешко О.В. *Основи та фундаменти* : навчальний посібник. Луцьк: ЛНТУ, 2017. 296 с.

3. Qusay Ali Q., Erdil B., Mohammed Jassam T. Critical cold joint angle in concrete. *Construction and Building Materials*, 409, 133881, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133881>.

4. ДСТУ Б В.2.6-145:2010. Конструкції будинків і споруд. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги (ГОСТ 31384-2008, NEQ), 2010. 56 с. (Національний стандарт України).

5. Бабич Є.М., Караван В.В., Бабіч В.Є. *Діагностика, паспортизація та відновлення будівель і інженерних споруд* : підручник. Рівне. Волинські обереги, 2018. 176 с.
6. Gungor A.G., Sengun E., Yilmaz Y., Yaman I.O. Enhancing bonding performance in two-layer roller-compacted concrete pavements: Bridging laboratory insights with field performance. *Construction and Building Materials*, 418, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135469>.
7. Кирилюк С.В., Піддубний О.О. Ефективні технології та мобільне обладнання для виготовлення фібробетонних фасадів. “*Ефективні технології в будівництві*”: II Міжнародна науково-технічна конференція. Київ, КНУБА, 2017. С. 77.
8. Суміші для торкретування. URL: <https://ceramax.in.ua/sumishi-dlya-torkretuvannya/> (дата звернення: 10.05.2024).
9. Кнауф Бетоконтат. URL: <https://knauf.kiev.ua/gruntovka/knauf-betokontakt-20-kg>. (дата звернення: 10.05.2024).
10. ДСТУ EN 196-1:2019. Методи випробування цементу. Частина 1. Визначення міцності (EN 196-1:2016, IDT), 2019. (Національний стандарт України).
11. ДСТУ Б EN 12504-1:2013. Випробування бетону в конструкціях. Частина 1. Зразки керні. Відбір, перевірка і випробування на стиснення (EN 12504-1:2009, IDT), 01.01.2014. (Національний стандарт України).

### References

- [1] DSTU-N B V. 1.2-18:2016. Nastanova shchodo obstezhennia budivel i sporud dlia vyznachennia ta otsinky yikh tekhnichnoho stanu. Kyiv: DP «UkrNDNTs», 2017.
- [2] I.O. Parfentieva, O.V. Vereshko, *Osnovy ta fundamenty: navchalnyi posibnyk*. Lutsk: LNTU, 2017.
- [3] Qusay Ali Q., Erdil B., Mohammed Jassam T., "Critical cold joint angle in concrete", *Construction and Building Materials*, 409, 133881, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133881>.
- [4] DSTU B V.2.6-145:2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Zakhyst betonnykh i zalizobetonnykh konstruktsii vid korozii. Zahalni tekhnichni vymohy (HOST 31384-2008, NEQ), 2010.
- [5] Ye.M. Babych, V.V., Karavan, V.Ie. Babich, *Diahnostyka, pasportyzatsiia ta vidnovlennia budivel i inzhenernykh sporud*: pidruchnyk. Rivne. Volynski oberehy, 2018.
- [6] A.G. Gungor, E. Sengun, Y. Yilmaz, I.O. Yaman, "Enhancing bonding performance in two-layer roller-compacted concrete pavements: Bridging laboratory insights with field performance", *Construction and Building Materials*, 418, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135469>. Accessed on: May 10, 2024.
- [7] S.V., Kyryliuk, O.O. Piddubnyi, "Efektyvni tekhnolohii ta mobilne obladnannia dlia vyhotovlennia fibrobetonnykh fasadiv. *Efektyvni tekhnolohii v budivnytstvi: II Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia*. Kyiv, KNUBA, 2017. P. 77.
- [8] Sumishi dlia torkretuvannia. [Online]. Available: <https://ceramax.in.ua/sumishi-dlya-torkretuvannya/> Accessed on: May 10, 2024.
- [9] Knauf Betokontakt. [Online]. Available: <https://knauf.kiev.ua/gruntovka/knauf-betokontakt-20-kg>. Accessed on: May 10, 2024.
- [10] DSTU EN 196-1:2019. Metody vyprobuvannia tsementu. Chastyna 1. Vyznachennia mitsnosti (EN 196-1:2016, IDT), 2019.
- [11] DSTU B EN 12504-1:2013. Vyprobuvannia betonu v konstruktsiiakh. Chastyna 1. Zrazky kerni. Vidbir, perevirka i vyprobuvannia na stysnennia (EN 12504-1:2009, IDT), 2014.

**ADHESION WHEN USING PARTIAL SHOTCRETE WITH MOBILE EQUIPMENT**

<sup>1</sup>**Kyryliuk S.V.**, Ph.D., Assistant Professor,  
kirilstani@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8871-8302

<sup>1</sup>**Chernov I.S.**, Ph.D., Assistant Professor,  
chernov.i.s@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8787-1006

<sup>1</sup>**Kyryliuk A.V.**, master's student,  
kyryliukart@gmail.com, ORCID: 0009-0002-7209-2998

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

**Abstract.** The current methods have been analyzed and materials that are used for the repair and renovation of concrete and reinforced concrete elements of the construction of the future. One of these is the considered method of shotcrete, the use of wet shotcrete, its advantages and disadvantages. Defects that occur during the manufacture, storage, transportation, installation and operation of concrete and reinforced concrete structures are given. The formation of different types of cracks that occur before the operation process and the appearance of cracks during the operation of structures under central tension and along one surface during eccentric tension are considered. The work presents regulation of the technical properties of repair mixtures achieved by the use of special types of cement, additives and aggregates, special laying methods and hardening conditions, as well as appropriate preparation of the surface of old concrete. The study is aimed at determining the adhesion of repair mixtures applied by the shotcreting method. Partial application of the repair mixture was used, using a mobile installation in laboratory conditions, in order to determine the optimal technological parameters of spraying. The methodology of experimental studies for determining the adhesion of fine-grained shotcreting using standardized forms with modernized partitions has been developed. Prepared beam halves with a surface angle of 20°, like old concrete, were used to increase the contact area and reduce swirl during shotcrete. A two-factor, nine-point plan of the experiment was developed, in which the thickness of the layer of fine-grained shotcrete (1 cm, 2 cm, 3 cm) of partial application and the speed of spraying of the shotcrete fiber concrete mixture (0 m/s, 35 m/s, 70 m/s) were varied. An experimental study was conducted and the results of the studies were presented.

**Keywords:** repair mixtures, mobile equipment, adhesion, partial shotcrete concreting, planning of the experiment.

Стаття надійшла до редакції 24.05.2024

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ у збірнику наукових праць “Сучасне будівництво та архітектура”

До опублікування у фаховій збірці наукових праць приймаються раніше не опубліковані наукові статті, із зазначеною нижче **тематикою публікацій**:

1. Архітектура.
2. Будівельні конструкції.
3. Будівельні матеріали та технології.
4. Гідротехнічне та транспортне будівництво.
5. Інженерні мережі та обладнання.
6. Основи та фундаменти.
7. Технологія та організація будівельного виробництва.

**Стаття повинна відповідати тематиці збірника, публікуватися вперше і включати такі елементи:**

- актуальність та постановку проблеми у загальному вигляді, її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;
- аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких представлено вирішення даної проблеми і на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується дана стаття;
- формулювання мети статті (постановка завдання);
- виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів;
- висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку у даному напрямку;
- список літератури.

### Загальні вимоги до оформлення тексту

Статті подаються в електронному вигляді файлом Word 97 – 2003 в форматі .doc. Назва файлу має містити номер тематики публікації та прізвище першого автора (наприклад, 5 Іванов.doc).

Статті подаються українською чи англійською мовою і друкуються мовою оригіналу.

Текстова частина статті набирається на аркушах формату **A4** шрифтом **Times New Roman 12** пт через одинарний інтервал, вирівнюється по ширині сторінки, поля по 2 см з усіх боків, абзацний відступ – 1,0 см. **Обсяг статті 7-16 повних сторінок разом з анотаціями.**

### Структура статті:

- *індекс УДК* (вирівняно по лівому краю без абзацного відступу, прописний, напівжирний);
- *назва статті* (відцентрована, усі літери прописні, напівжирні, переноси не допускаються);
- *прізвище, ініціали всіх авторів, науковий ступінь, вчене звання* (вирівняно по правому краю, прізвище – напівжирний; ступінь і звання – рядковий);
- *повна назва вищого навчального закладу чи організації* (курсив, вирівняно по правому краю; якщо автори з різних навчальних закладів, то кожен автор з окремого рядка);

- *електрона пошта* (вирівняно по правому краю та поряд унікальний номер ORCID);
- *анотації до статті* (абзацний відступ, назва напівжирна, анотації пишуться двома мовами: українською і англійською).

Текст першої анотації пишеться мовою основного тексту статті та повинен бути **не менш як 1800 знаків**.

Текст другої анотації, якщо видання не є повністю англійськомовним, кожна публікація не англійською мовою супроводжується анотацією англійською мовою обсягом **не менш як 1800 знаків**. Якщо видання не є повністю українськомовним, кожна публікація не українською мовою супроводжується анотацією українською мовою обсягом **не менш як 1800 знаків**. Друга анотація розміщується в кінці статті після списку літератури на англійській мові.

Дві анотації повинні коротко повторювати структуру статті, що включає вступ, мету, методику, результати, висновок. Машинний переклад **не дозволяється**.

- *ключові слова* (міжрядковий інтервал не робиться, абзацний відступ, назва напівжирна, текст ключових слів не більше 6–8 слів).

Назва статі, прізвище і ініціали, науковий ступінь, вчене звання, місце роботи, анотація і ключові слова – повторюються українською та англійською мовами.

Між рядками з індексом УДК, назвою статі, прізвищем авторів, анотацією, основним текстом і переліком літератури, літературою на англійській мові та другою анотацією одинарний інтервал.

- *Основний текст статті*.

Структура основного тексту статті згідно з постановою ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 р. (Бюлетень ВАК України №1, 2003 р.) повинна мати такі необхідні елементи (*назви структурних елементів в тексті статті потрібно виділити напівжирно*):

- вступ (постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями);

– аналіз останніх джерел досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми (бажано, щоб це був аналіз останніх публікацій у фахових журналах) і на які опирається автор, виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття;

- постановка мети та завдання (формулювання мети та завдань досліджень);

– матеріали та методи дослідження (опис використаних матеріалів та методів дослідження проблеми, що розглядається у статті);

– основний матеріал і результати (виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів);

– висновки (наукова новизна, наукове та практичне значення результатів дослідження, перспективи подальших наукових розроблень);

– *література* (відцентрована, напівжирна; посилання в тексті подають у квадратних дужках [2]; список літератури наводиться відповідно порядку посилань у тексті згідно з ДСТУ 8302:2015 та записується в стовпчик; написання «Джерела інформації», «Перелік літератури» **не допускається**). Бібліографічний список наводиться мовою оригіналу та транслітерується. Кількість посилань на літературні джерела у статті повинно бути не менше 15 джерел. Особлива увага приділяється сучасним англійськомовним статтям, зокрема індексованих WoS або Scopus.

– *бібліографічний список (References)*. Для відтворення українських власних назв засобами англійської мови при перекладі публікації англійською мовою застосовується транслітерація. Найменування організацій та установ, що не перекладаються на англійську мову, також транслітеруються. Транслітерація прізвищ авторів виконується залежно від мови оригіналу джерела відповідно до вимог Постанови Кабінету Міністрів України від 27.01.2010 р. № 55 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею». Бібліографічний список повинен бути оформлений з використанням стилю *IEEE STYLE* згідно з «Міжнародним стилем цитування та посилання в наукових роботах», Київ, 2016.

*Таблиці* слід виконувати в редакторах Word без заливання. Кожна таблиця має бути надрукована з відповідним заголовком та нумерацією після першого посилання на неї.

Ширина таблиць не повинна перевищувати поля сторінки. Шрифт в таблиці повинен відповідати шрифту статті.

**Формули** мають бути виконані в редакторі формул *Equation 3.0* чи *MathType* з використанням тільки загальноприйнятих шрифтів (Times New Roman; Symbol). Кожна формула набирається як один об'єкт, нумерація формул арабськими цифрами справа в дужках вирівняна по ширині сторінки.

**Рисунки** (діаграми, фото), подаються у чорно-білому, кольоровому варіанті або у градаціях сірого кольору після першого посилання на них; мають бути згруповані та являти собою один графічний об'єкт; мати нумерацію та підпис позначення ось координат. Розміри підписів на рисунку повинні відповідати шрифту Times New Roman 12 пт.

**Разом зі статтею подаються:**

– відомості про автора (авторська довідка): прізвище, ім'я, по батькові (повністю); вчене звання, вчений ступінь; посада, місце роботи; контактні адреси й телефони; поштова адреса, на яку надсилати примірник збірника

– рецензія на статтю, якщо автором є аспірант без співавторів з вченим ступенем та вченим званням.

**Статті, які не відповідають наведеним вимогам, до розгляду не приймаються.**

Подані матеріали підлягають додатковому рецензуванню членами редколегії або провідними фахівцями за науковими напрямками, тому можуть бути повернені авторам на доопрацювання.

Остаточне рішення щодо публікації статті приймає редакційна колегія видання.

Відхилений оригінал не повертається.

Оплата здійснюється тільки після підтвердження прийняття статті до друку.

Вартість публікації статті **1100 грн**. Збірник виходить 4 рази на рік щоквартально, в кінці кожного кварталу. Статті необхідно надсилати до 1 числа останнього кварталу (наприклад, якщо збірник виходить в кінці червня, то статті приймаються до 1 червня). Але прийом статей може закінчитись раніше вказаного терміну, якщо буде набрано необхідну кількість сторінок.

**Матеріали надсилати за адресою:**

Редакція «Сучасне будівництво та архітектура»

Одеська державна академія будівництва та архітектури,

вул. Дідрихсона, 4

м. Одеса, 65029, Україна

Контактна особа: Антонюк Надія Романівна

тел. роб. (048) 70-00-608

**e-mail:** visnuk\_odaba@ogasa.org.ua

**Сайт збірника:** <http://visnyk-odaba.org.ua/>

**Платіжні реквізити:**

Центр НТТМ по АБ, код **21028281**,

МФО **320478**, Р/р **UA 10320478000026009924861812** в ПАТ АБ «Укргазбанк»,

**Призначення платежу:** «Сучасне будівництво та архітектура, ПІБ першого автора»

Просимо після відправлення матеріалів обов'язково зателефонувати або зв'язатися електронною поштою, щоб упевнитися в отриманні матеріалів та рішенні редакційної колегії щодо публікації статті.

*Наукове видання*

**СУЧАСНЕ БУДІВНИЦТВО ТА АРХІТЕКТУРА**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

**Випуск № 8  
червень 2024**

Головний редактор *Вировой В.М.*  
Технічний редактор *Антонюк Н.Р.*

Підписано до друку 8.07.2024 р.  
Формат 60×84/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.  
Цифровий друк. Ум.-друк. арк. 15,2.  
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@ogasa.org.ua

---

Надруковано в авторській редакції з готового оригінал-макету  
в редакційно-видавничому відділі ОДАБА