

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 № 2
грудень 2022**

ОДЕСА 2022

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

Випуск № 2, грудень 2022

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);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Технічна редакція:

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

Рекомендовано до видання Вченою радою ОДАБА

Протокол № 4 від 28.12.2022 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), 2022

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 № 2
December 2022**

ODESSA 2022

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

Issue № 2, December 2022

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 № 4, 28 December, 2022.

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), 2022

ЗМІСТ

АРХІТЕКТУРА

| | |
|--|----|
| Байбак Д.О. Про адаптацію мережі спортивно-дозвіллевих комплексів міст України до зміни клімату..... | 9 |
| Кисельова Г.В., Кисельов В.М., Лісова А.П., Калинка В.М. Особливості адаптації міського середовища під потреби дитини..... | 20 |

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

| | |
|---|----|
| Карпюк І.А., Карпюк В.М., Клименко Е.В., Глібоцький Р.В. Вуглецевий слід бетонної транспортної споруди-тунелю глибокого розташування..... | 27 |
| Сур'янінов М.Г., Крутій Ю.С., Карнаухова Г.С., Клименко О.М. Аналітичний метод розрахунку кільцевих плит на змінній пружній основі..... | 37 |

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

| | |
|--|----|
| Барабаш І.В., Бабій І.М., Стрельцов К.О. Інтенсивна роздільна технологія і її вплив на властивості цементно-водних композицій, розчинів та бетонів на їх основі..... | 44 |
| Довгань О.Д., Ляшенко Т.В., Хлицов М.В. Аналіз властивостей декоративного бетону в ізопараметричних умовах критеріїв оптимальності..... | 52 |
| Кривяков С.О., Полторапавлов А.О., Міщутін А.В., Заволока М.В. Вплив кількості фібри і суперпластифікатору на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів..... | 60 |
| Сумарюк О.В., Собко Ю.Т., Черненко К.В. Аналіз мікроструктури зламів бетону в конструкціях, які працюють на стиск та її вплив на міцність..... | 70 |
| Цапко Ю.В., Бондаренко О.П., Цапко О.Ю., Нерода В.П. Моделювання процесу передачі тепла до тканини через інтумесцентне покриття..... | 77 |

ІНЖЕНЕРНІ МЕРЕЖІ ТА ОБЛАДНАННЯ

| | |
|---|----|
| Кравчук А.М., Кравчук О.А. Вплив величини похилу на розрахункові параметри збірних дренажних трубопроводів... | 88 |
| Медведєв О.Ю., Медведєва О.О. Якість води озера Катлабух..... | 97 |

ОСНОВИ ТА ФУНДАМЕНТИ

| | |
|---|-----|
| Осадчий В.С., Анісімов К.І., Бааджи В.Г. Протизсувна споруда у вигляді контрфорсів з буросічних паль..... | 104 |
|---|-----|

ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Менейлюк О.І., Кирилюк С.В., Бочевар К.І.

Оцінка нового конструктивно-технологічного рішення огорожувальної конструкції в незнімній опалубці..... 113

Вимоги до оформлення статей у збірнику Сучасне будівництво та архітектура..... 123

CONTENTS

ARCHITECTURE

- Baibak D.O.**
Adaptation of sports and leisure complexes network in Ukrainian cities to climate change..... 9
- Kyselova G.V., Kyselov V.M., Lisova A.P., Kalynka V.M.**
Features of the adaptation of the urban environment to the needs of the child..... 20

BUILDING STRUCTURES

- Karpiuk I.A., Karpiuk V.M., Klymenko Ye.V., Hlibotskyi R.V.**
Carbon footprint of a concrete transport structure-a deep tunnel..... 27
- Surianinov M.H., Krutii Y.S., Karnaukhova A.S., Klymenko O.M.**
Analytical method for calculating annular plates on a variable elastic base..... 37

BUILDING MATERIALS AND TECHNIQUES

- Barabash I.V., Babiy I.N., Streltsov K.O.**
Intensive separate technology and its influence on the properties of cement-water compositions, solutions and concretes on their basis..... 44
- Dovgan A.D., Lyashenko T.V., Khlytsov N.V.**
Analysis of properties of decorative concrete in isoparametric conditions of optimality criteria... 52
- Kroviakov S.O., Poltorapavlov A.O., Mishutin A.V., Zavoloka M.V.**
The influence of the amount of fiber and superplasticizer on the strength of concrete for the rigid pavements..... 60
- Sumaryuk O.V., Sobko Yu.T., Chernenko K.V.**
Analysis of the microstructure of concrete fractures in structures that work on compression and its impact on strength..... 70
- Tsapko Yu., Bondarenko O., Tsapko A., Neroda V.**
Simulation of the process of heat transfer to tissue through intumescent coating..... 77

UTILITY NETWORKS AND FACILITIES

- Kravchuk A.M., Kravchuk O.A.**
The slope influence on calculated parameters of collecting drainage pipelines..... 88
- Miedviediev Oleh, Miedviedieva Olha**
Water quality of lake Katlabukh..... 97

BASEMENT AND FOUNDATIONS

- Osadchy V.S., Anisimov K.I., Baadzhi V.G.**
Landslide protection structure in the form of counterforts made of bored piles..... 104

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF BUILDING PRODUCTION

Menelyuk O.I., Kyryliuk S.V, Bochevar K.I.

Evaluation of the new constructive-technological solution of the fence structure in the non-removable formwork..... 113

Requirements for the articles formation in collection Modern construction and architecture 123

ADAPTATION OF SPORTS AND LEISURE COMPLEXES NETWORK IN UKRAINIAN CITIES TO CLIMATE CHANGE

Baibak D. O., graduate student,
diana.baybak@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3878-2194
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine
St. Marshal Bazhanov, 17, Kharkiv, 61002, Ukraine

Abstract. The climate change that is taking place all around the world today presents challenges for all inhabitants of the planet, including the citizens of Ukraine. Taking all of these circumstances into consideration, it is necessary to introduce new methods of forming the environment that meet the new conditions. The article examines the influence of climate change on the recreational spaces of Ukrainian cities focusing on the location of sports and leisure complexes and their facilities. The article explores the influence of the temperature and humidity of the recreational environment on the athletes' performance and health.

The work identifies and systematizes the positive and negative effects of the climate change on a network of sports and leisure complexes and their athletes. The main implication is that outdoor activities can cause heat stress during periods of high ambient temperature. This indicates that the existing sports and leisure complexes are not adapted to climate change. The paper studies the world's practical ways of adapting the urban environment to climate change paying particular attention to a system for alerting the population about the heat waves and informing the citizens about ways to strengthen their immunity; the creation of green and water infrastructure in cities and suburban areas; systems for objective monitoring of diseases and infectious agents affected by climate change, as well as planning for the prevention of these diseases; ensuring the population's access to clean drinking water and monitoring compliance with the technology of disinfection and purification. The study, premised on this analysis, has provided several proposals for adaptive measures implemented while designing a network of sports and leisure complexes in the architectural and urban planning aspects. It is predicted that such measures will help visitors adapt to climate change.

It enables us to develop approaches for forming a future network of sports and leisure, taking into consideration cities' changing climatic conditions.

Keywords: Ukrainian cities, climate change, athlete's performance, climate adaptation, the network, sport and leisure complex.

Introduction. Climate (from the Greek Κλίμα – slope) is the long-term pattern of weather in a particular area. It is formed due to the interaction of cosmic, atmospheric, and terrestrial natural factors, and together with other natural components, it creates a natural habitat. Together, these factors are climatic, although more accurately they are called astronomical, modern climate-forming and geographical factors.

The main astronomical, modern climate-forming and geographical factors include cosmic, ultraviolet, light, thermal, and radio wave radiation which reaches Earth from the Sun and the stars; temperature, humidity, mobility, atmospheric pressure, and other meteorological factors; chemical composition of the air; electric, magnetic and gravitational fields of the Earth; geographic latitudes, the height of the area above sea level, landscape zones; seasonal and daily periods. At the same time, the characteristics of the climatic conditions of each region have their own peculiarities. In particular, in order to characterize the climatic conditions that have developed on the territory of the Poltava region (and neighboring regions), the most important is the magnitude and nature of solar radiation, the remoteness of the territory from large water masses (oceans), relation of the territory to the zones of predominantly Atlantic temperate and arctic cold air masses, flatness of the territory [1].

Throughout the course of history, human activity is clearly connected with the environment. At first, it was a usual natural environment, which was gradually transformed to meet peoples' various needs. In the end, it resulted in the appearance of a natural-anthropogenic environment. Then, thanks to new technologies, certain types of artificial environments were created. Now it is possible to divide environmental types according to the level of development or cultivation into such types: natural, natural-anthropogenic (*landscaping is added to the natural environment*), anthropogenic-natural (*natural components are introduced to the artificial environment*) and artificial (*used mostly at great depths of the sea or in space*) [2]. Typically, architects work to create or form natural-anthropogenic and anthropogenic-natural types of environment, which include the environment for the full functioning of sports and leisure complexes in the structure of the city.

Most of the types of sports that are developed in sports and leisure complexes have appeared through the interaction between people and the environment of the city. *Skateboarding* was first invented in the 1950s in California, where surfers used schoolyard to simulate waves on days when they were low [3]; *The Parkour* adventure began in France in the 1990s, in Lisses on the outskirts of Paris. David Belle originally developed the Parkour concept according to precepts about the art of movement laid down by his father Raymond Belle, who was a Parisian firefighter and veteran of the French Special Forces. For them, Parkour was just a kind of training method to overcome all forms of obstacles in urban and natural environments, such as forests [4]; *Roller skiing* was born from the training of skiers in the summer months when there was no snow. The sport was born in Italy and Northern Europe in the mid-30s of the 20th century [5]; *Kickscooting (or extreme scootering)*, the first athletes of this sport, appeared in the 1990s – early 2000s. This sport is based on two disciplines: *street* and *park*. In the park discipline, athletes perform amplitude tricks in skate parks. And in the street discipline, the rider has to do the sliding and jumping from the stairs on the natural landscapes of the city streets [6].

Finally, it can be argued that the development of sports inherent in sports and leisure complexes also led to the emergence of special sports facilities that can serve as the basis for their further improvement. However, until recently, the climatic conditions of the environment that affect these objects were taken for granted, while the consequences of possible changes in the natural environment were mostly ignored because it is known that sport and the environment have a two-way relationship [7, p. 2]. In general, the data mentioned above indicate the relevance of issues related to the vulnerability of Ukrainian cities to climate change and the introduction of sustainable methods for adapting the network of sports and leisure complexes to the structure of these cities in particular.

Analysis of research sources and recent publications. The results of the research have their own characteristics, a brief analysis of which showed the following. Monograph Boyko O. P. "Leisure culture in a risk society" [8] is devoted to the research of transformational processes and prospects for the development of leisure culture in a risk society. The author proved that leisure as a phenomenon is ambivalent. On the one hand, recreational activity provokes and intensifies those risky situations created by a human; on the other hand, it has powerful recreational potential. All of these generate great interest in leisure activities in the modern world.

The conducted studies of Bogushenko A. O., and Khomenko I. A. regarding the vulnerability of four cities of Ukraine (Kyiv, Odesa, Uzhgorod, Poltava) show that all cities have become more vulnerable to increased temperature over the past twenty years [9, p. 12].

In general, scientists have already reached a global consensus that the climate has changed over the past 150 years, mainly due to human activity. Global temperatures are increasing, rainfall patterns are becoming more unpredictable, and sea level is rising. These trends are expected to continue in the next decades. Depending on the geographical features of the location of the settlement, the consequences of climate change can be various [10]:

- abnormally high temperatures lasting a certain amount of time and causing "urban heat islands" and heat stress for residents;
- flooding and landslides;
- the increased vulnerability of urban green areas and their decline;
- natural hydrometeorological phenomena, increasing their frequency and destructive impact on infrastructure;

- deterioration in the quality and a decrease in the quantity of drinking water in a certain area;
- an increase in the number of infectious diseases and allergic reactions among the population;
- increased vulnerability of the energy systems of the settlement to destruction, which disrupts the stability of the energy supply [9, p. 11].

Civil society and The International Committee of the Red Cross and Red Crescent Movement play an important role in raising awareness of the authorities and the public about the risks of climate change and encouraging people to act on those risks. The Climate Forum East is a project within the six countries of the Eastern Partnership aimed at strengthening the capacity of civil society in its interaction with decision-makers on these issues and encouraging the youth and local communities to respond to challenges faced by their countries experiencing climate change [10, p. 4].

The signs of climate change mentioned above, affect urban residents differently, depending on their gender, age, income, and physiological characteristics of the body. However, the presented facts indicate that when considering the formation of a network of sports and leisure complexes (SLC) in the structure of the largest cities of Ukraine, it is extremely important to pay attention to abnormal heat, the vulnerability of urban green areas and disruption of the urban infrastructure. In many respects, the success of reducing the negative impact of climate change on a person and the environment depends on the effective architectural and urban integration of the SLC network into the structure of settlements.

Purpose and objectives. The purpose of this work is to determine adaptive measures for the formation of a network of sports and leisure complexes in the structure of Ukrainian cities in the context of climate change.

To achieve the goal, the following tasks were solved:

- analysis of studies on the impact of climate change on Ukrainian cities;
- analysis of works on the impact of climate change on the performance and health of athletes;
- existing measures are taken by sports organizations to adapt to the effects of climate change.

Methods. The main methods for achieving the set goal are terminological analysis, the method of observation and analysis of modern scientific sources on the impact of climate change on existing sports and leisure facilities, and physical activity and recreation (restoration of physical and spiritual strength) of a person. Since the impact of climate change on sports and leisure facilities is a poorly researched topic, therefore, there is no sufficient understanding of the scope and the nature of the evidence presented in the literature.

The base material and results of research. Over the past 30 years, the Ukrainian Hydrometeorological Center has recorded new climatic anti-records in most cities of Ukraine [9, p. 11]. The change in the maximum temperature during two periods (I – 1961-2005 and II – 2016-2019) in the largest cities of Ukraine is in Kyiv from 38 to 39 °C, Kharkiv from 40 to 41 °C, Odesa from 40 to 41 °C, Dnipro from 40 to 41 °C, Donetsk from 39 to 41 °C, Zaporizhzhia from 40 to 41 °C, Lviv 36 °C (no change) (Fig. 1).

Since 2019, it is no longer about changes, but also about a climate emergency (as defined by the UN). The temperature has risen to 1.1-1.2 °C compared to the pre-industrial period (i.e. before the 1850s). As Natalya Gozak, executive director of the Ecodia Center for Environmental Initiatives, explains: "International experts say that when the temperature rises above 1.5-2 °C, it will be difficult for humanity to lead a lifestyle which they are accustomed to. There will be problems with water supply, droughts, and some regions will become uninhabitable" [11].

The problem of increased air temperature and humidity worsens indicates that global warming will reach 1.5 °C between 2030 and 2052, and approximately 3 °C in 2100, which will have a devastating impact on cities [12]. This becomes one of the immediate issues in the formation of the SLC network because these spaces are the main place for city residents to do sports and leisure activities or spectating them. When the sports environment becomes too hot for normal physical activity, it can lead to heat stress. In such a state when the body cannot cool down properly, therefore the internal temperature of the body continues to rise to a dangerous level and key organs may suffer and gradually reduce their functions. This also happens because a person cannot sweat because the air is too humid.

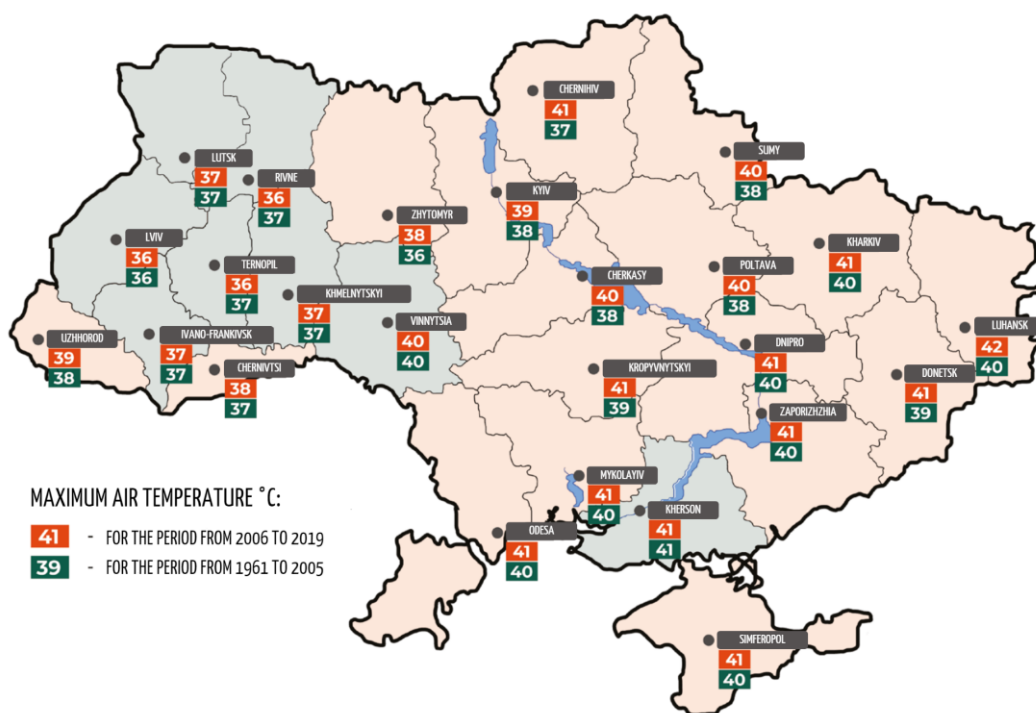


Fig. 1. The maximum temperature, °C [9, p. 13]

Outdoor activities during periods of elevated ambient temperatures can lead to increased body temperature and dehydration, which can cause heat exhaustion or heat illness. Risks of heat stroke or heat illness while playing or spectating at sport competitions; these risks depend on both environmental factors (e.g. hot weather) and personal factors (e.g., age, poor physical fitness, health conditions) [13].

Thermal stress and thermal comfort were identified as possible risks for athletes in the sports of cycling, tennis and football (these sports are presented in SLC). Researchers found that the primary health consequences of thermal stress include heat exhaustion, heat stroke, and hyperthermia. Due to prolonged exposure (i.e., playing sport outside in hot conditions) and the physical exertion involved in sport, athletes may be at higher risk for experiencing heat-related illnesses compared to spectators or the general population [7, p. 8] (Fig. 2).

The main goal of the formation of the SLC network is to provide high-quality, comfortable, and affordable sports and leisure activities for all sectors of society. Such activities are aimed to provide people with an opportunity to do sports in order to improve their health.

In the context of the pandemic, it was possible to observe how the importance of open public spaces, namely the SLC, increased due to the necessity for people to stay at home, away from the offices, or other premises [9, p. 24]. This indicates that sports and leisure spaces that are designed without considering climate change will be harmful for visitors, such as calisthenics athletes (people who do not do sport professionally, but what to be physically healthy and keep fit).

This paper draws attention to the impact of climate change on calisthenics athlete in the context of the infrastructure of the SLC, located mainly within parks, squares, and recreational areas of the city. Of course, not only athletes but also people with children can suffer from heat waves in the open spaces of the SLC (in Ukraine, these are mostly women: mothers, grandmothers, nannies, also people with disabilities, etc.). High temperatures, especially in summer, do not allow one to feel comfortable while walking or cycling between poorly designed SLC spaces and will directly affect the health of these people.

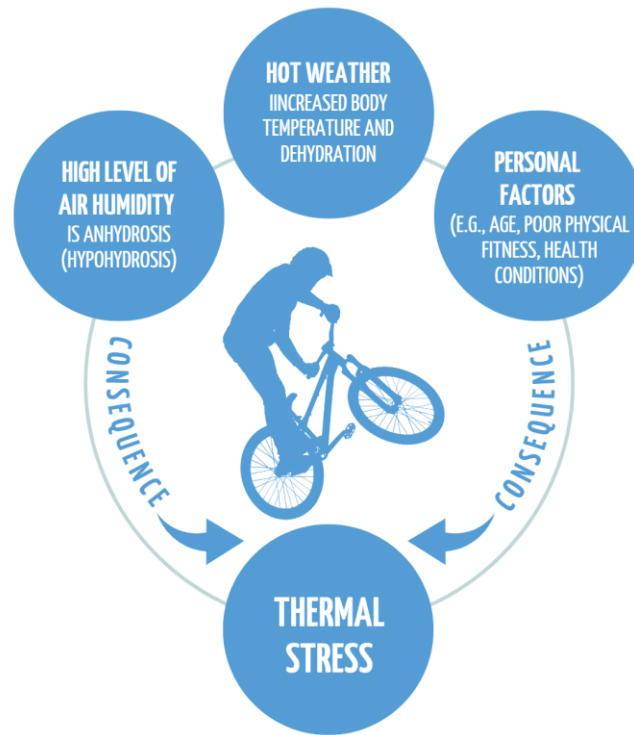


Fig. 2. The reaction of the athlete's body to outdoor activities during periods of elevated ambient temperature

It can be assumed that women and children are disproportionately affected by heat waves within sports and leisure spaces, for example, on playgrounds without tall trees. In the current State building codes of Ukraine (Change №2 DBN B.2.2-5:2011. Playgrounds. Improvement of adjacent territories. Norms and Rules) and sports (DBN B.2.2-5:2011. Sports grounds. Improvement of adjacent areas. Improvement of the territories) of the sites, landscaping of these spaces are already envisaged. At the same time, these norms are designed for new sites. Currently, there are no control mechanisms so that the sites built according to the old norms (DBN B.2.2-5:2011. Landscaping) are updated and landscaped [9, p. 25].

Research shows that green spaces improve physical and mental health. For example, in areas with a lot of trees, residents are less likely to get asthma. Comfortable green spaces encourage the elderly and children to do sports. In addition, they create a therapeutic effect for people with mental illnesses [14]. The disappearance of green areas will have a disproportionately negative impact on athletes, as they are more dependent on comfortable outdoor sports and leisure areas.

The infrastructural changes differ based on the hazard, but range from adding shade or fans along the course of a marathon route, to installing outdoor cooling technologies for open-air stadiums, to building brand new facilities [7, p. 9]. Protection against overheating in the SLC territory can include slowing down or pausing for a water break, changing equipment (e.g., to reduce the number of layers worn [15]), or reducing the time for sports, which affects the performance of the athlete.

Adaptation of the urban environment to climate change can be achieved in different ways. For example, in the United States and some other countries, a system of measures to alert the public about heat is widespread. It helps to reduce the negative impact of hot weather on public health. In the world, measures are also used to reduce the negative effects of climate change on the health of the population of large cities, in particular, this is the creation of a system for objective monitoring of diseases and pathogens affected by climate change, as well as planning work to prevent these diseases. Particular attention is paid to informing the population about ways to strengthen the immune system to form the body's resistance as well as providing residents with access to clean drinking water and monitoring water disinfection and purification technology. Furthermore, there is a campaign to raise public awareness about the impact of climate change on the emergence of new

allergens and the spread of certain diseases (their symptoms and giving first aid) [16].

In addition, calisthenics athlete need to be provided with water, and medical care on the territory of the SLC, which may respond to the consequences of overheating or injury, and offering athletes access to a cooling agent (e.g., cooling towel, mist showers [17]).

Infrastructural upgrades and equipment changes were also commonly invoked as an adaptive strategy that may help sport organizations to manage the impacts of heat [18]. To prevent this, "cool materials" are used in construction and arrangement. Such materials could lead to the decrease in surface/ambient temperatures and thus significantly improve the thermal comfort in public spaces [19]. At the same time, cold benches on the territory of the SLC, for example, may not be suitable for use at low temperatures in winter.

The availability of drinking water sources at sports and leisure venues at high temperatures is critical, especially for vulnerable groups such as athletes, children, the elderly, and people with chronic diseases. The infrastructure of the existing SLC does not mainly provide access to drinking water. As a result, people may not be able to buy water in a shop or cafe, and free water in drinking fountains may be of poor quality and does not meet sanitary standards, and require the installation of filter systems.

In some cities there are systems of public pump rooms, but their water is not always of high quality. According to the latest estimates of the communal enterprise Kyivvodfond, the water in the pump rooms of Kyiv, for the most part, complies with the standards. At the same time, there are doubts that such a check is carried out in other cities of Ukraine. The pump rooms are often the only source of water for SLC visitors, in conditions of high temperatures, but it can be harmful to them [9, p. 25].

Today, some municipal infrastructure functions are being transferred to private commercial institutions. This means that access to the basic needs of some people who want to spend their leisure time outdoors is limited to a certain extent.

As an emerging literature, the most consistent thread across the studies is the importance of benchmarking past and current conditions for sport and setting parameters around what is considered safe playing conditions for competition. These parameters, once established through further research centered on the health and safety of players and spectators [15, 17], will impact adaptation requirements and innovation [18]. They could also impact the general organizing principles of sport [7, p. 10].

An increase in the water level in rivers, lakes, and seas can harm the infrastructure of the SLC in the structure of parks, squares, and waterfront area, and destroy it. In addition, staying in sports and leisure spaces during bad weather or heat waves poses a threat to visitors, especially athletes. For example, they cannot isolate themselves indoors, and may not have the means of communication to report a threat to their life and health.

People on low often live in the outskirts of the city. Residents of peripheral areas have to use additional means to get to SLC, spend more time on public transport, or use private transport compared to residents of central areas who travel short distances on foot. Unlike residents of central districts, who walk short distances, residents of peripheral areas have to use additional means such as public or private transport to get to SLC. During periods of high temperatures, long journeys on routes that are not adapted to climate change can cause heat stress or increase the likelihood of the appearance and development of chronic diseases. Therefore, the network approach improves conditions for residents of peripheral areas, since the uniform location of the SLC in the city and the presence of green corridors connecting the SLC with each other will make the distance to the SLC less time-consuming and more comfortable for visitors of these facilities.

In addition, frequent and unpredictable abnormal weather conditions cause the destruction of trees and the reduction of green spaces as SLC is a part of these spaces. For example, flooding erodes the ground under trees, exposing their roots. This makes the trees more vulnerable to strong winds. As it was mentioned earlier, green spaces are important in sports and leisure facilities because they protect people from overheating. In Ukraine, there is a separate state-building norm regarding and flooding of structures (DBN V.1.1-25-2009. Engineering protection of territories and structures from flooding). However, in sports facilities, not only buildings can be affected, but also sports equipment in there.

In many countries of Europe and the world, one of the ways to adapt is the creation of green and water infrastructure in cities and suburban areas. This combination of water and plants is beneficial way to respond to climate change. First, during heavy rains, green corridors, which are a combination of water and plants, act like a sponge, absorbing large volumes of water when no sewerage system can handle it. Secondly, dense tree planting holds back gusts of wind. Thirdly, green spaces absorb carbon dioxide, thereby combating both the causes and consequences of climate change [11].

The first part of the study reports on the impact of climate change on the performance and health of athletes. It allowed us to compare existing data on the impact of climate change on the athlete and their professional space. In addition, on the basis of this information [20], which indicates the consequences of climate change by the middle of the 21st century in Ukraine, one can understand how the city-planning capital of Ukraine will adjust to it. This made it possible to hypothetically formulate adaptive measures for the formation of the SLC network in the structure of cities (Fig. 3):

1. *A further change in the thermal regime may have a significant impact on the Ukrainian energy sector.* The positive consequences of global warming for the energy sector may be a decrease in a number of energy sources needed for sports facilities during the winter period [21, p. 25]. However, the optimum temperature for human life is on average 18-22 °C. Physical activity at a heart rate of 140-150 mail/min is the most effectively done at a temperature of 16-17 °C. At a heart rate of 170-180 mail/min the comfort zone for an athlete is 13-14 °C. Maintaining a comfortable temperature regime for athletes during a hot season will lead to a partial increase in energy consumption for air conditioning, thereby balancing energy costs.

2. *Warming will lead to a significant increase in the mineralization of groundwater, and consequently to their limited use.* The reserves of drinking water with the temperature increasing up to 2.5 °C practically will not change, but if it rises to, by 5-6 °C the reserves can decrease by 10-15% [20, p. 19]. It is very important for athletes to replenish their water-salt balance and not cause dehydration. Therefore, it is not only necessary to install drinking fountains on sports and leisure grounds, but also to think in advance whether there will be enough supply from a separate source or how to collect rainwater and purify it locally.

3. The best-case scenario of global warming (temperature increases up to 2.5 °C) will lead to shorter and milder winters with a temperature of 2-3 °C and their reduction. With a temperature of 2.5 °C or more prominent warming in some regions, winters may disappear altogether [20, p. 20].

Changes in air temperature and precipitation will significantly affect the recreational potential of Ukraine. A decrease in the amount of snow, the duration of the winter season will significantly decrease the share of recreational activities during this period. As a result, it will lead to unprofitability or incomplete use of the possibilities of winter sports facilities. Particularly susceptible to rising temperatures are winter activities in the Carpathian recreational region due to the melting of snow cover and extreme weather conditions [21, p. 25-26]. This encourages people to show greater interest in developed sports and leisure spaces in the region. A wider range of services offered by the SLC should be planned for the future.

4. *The greatest peak of recreational activity will be observed in summer in July-August.* However, an increasing number of hot days may encourage some potential holidaymakers to change the time of their vacation and spend it in other regions that are outside Ukraine [21, p. 26]. This stimulates owners to include water bodies in the SLC and provide other services such as (e.g., catering in restaurants, and cafes). It is also well-known fact that when preparing for competitions in a hot climate, you need to train in similar conditions for 10-14 days. This information gives an understanding that it is necessary to inform and instruct the population how to prepare for a hot season.

5. *The expected increased temperature will lead to the instability of the snow cover and a decrease in the proportion of rivers fed by meltwater.* In the worst case scenario, this will lead to the shallowing of many small rivers in the mountainous and foothills. In summer, the situation is somewhat better, as the total water loss is replenished by frequent rains and an increased proportion of rivers which are fed by underground sources. Therefore, the most resistant to climate change will

be the rivers with underground springs. Intense rain floods will have a significant impact on runoff. The total value of river runoff may decrease in the northern regions by 5-7 %, and in the southern regions by 15-30 % [20, p. 20].

The situation with small rivers can become especially threatening, most of which are fed mainly from meltwater, and 80 % of their river runoff is during spring floods. As a consequence of global warming, many of these rivers may cease to exist due to a decrease in snow reserves, and floodplains will disappear along with them, which will mean the deprivation of a significant amount of moisture that these floodplains retain throughout the year [20, p. 20].

Global warming will unequivocally lead to an increase in the sea level of the Black and Azov Seas, which in turn will intensify the processes of coastal erosion, flooding and salinization of soils in the Black Sea region, and will also lead to significant changes in the ecosystems of the estuaries of the Danube, Dnieper, and Dniester [20, p. 20]. Therefore, the location of the SLC, which in practice gravitates towards water sources, should be near rivers with underground springs and have a certain radius of indentation from the coastline.



Fig. 3. The main adaptive measures for the network of sports and leisure complexes in the structure of Ukrainian cities in new climatic conditions

The adaptation of the SLC network in the structure of Ukrainian cities provides steps that allow visitors to adapt to changes:

- first of all, you should understand that there are already changes. It is necessary to estimate vulnerability assessment of the city to climate change so that scientists analyze and work out several scenarios (climate change adaptation and mitigation plan);
- if earlier we considered streets, roads, and houses as urban infrastructure, now we need to add water-green objects to them, in this case, green corridors (a combination element between the SLC), because they act as a full-fledged engineering system. Such zones will be green reservoirs of clean and cool air in summer and will soften the microclimate in winter [11];
- in terms of regulatory support, the development of a green space should be regulated, since it contributes to the improvement of the physical and mental health of the population. The percentage of SLC developments in the structure of green spaces should be no more than 30%;
- drinking water supply at sports and leisure facilities with further monitoring of water quality;
- access to a cooling agent (e.g., cooling towel, mist showers) and water spaces (e.g., swimming pools);
- adding shade or fans along the routes to SLC and around sports areas;
- use of appropriate materials for sports equipment;
- there should be a system of measures to alert the public about heat waves.

Conclusions. In the course of the study, certain general results can be pointed out. The main of which are stated further.

Among the factors selected for this analysis were the magnitude and nature of solar radiation, the remoteness of the territory from large water masses (oceans), the relation of the territory to the zones of predominantly Atlantic temperate and arctic cold air masses, and the flatness of the territory. According to environmental types based on the level of development, it was advisable to choose natural-anthropogenic and anthropogenic-natural types of environment, which include the environment for the full functioning of the SLC in the structure of the city.

An analysis of the results of recent studies that have already been published showed that the largest cities of Ukraine have become more vulnerable to climate change in the last years of the 21st century, where the absolute temperature maximum of cities has risen by an average of 1 °C. This sparks scientists' interest in studying the problems of transformational processes and the prospects for the development of a leisure culture in the abnormal heat, the vulnerability of urban green spaces, and disruption of the functioning of urban infrastructure. One of the promising solutions for overcoming the negative impact of climate change in Ukrainian cities can be the effective architectural and urban integration of the SLC network into the structure of settlements. Such a system of SLC allows the population to adapt to new climate changes and survive in these conditions. In addition, it lets us divide cycling routes according to their actualization and necessity in the new conditions.

Also, the study revealed that outdoor sports activities during periods of high ambient temperature can lead to thermal stress, which is caused by humid air, high ambient temperature, and personal physical abilities of the visitor. This indicates that the existing sports and leisure spaces are not adapted to climate change. They do not have air conditioning systems, shady awnings, and access to drinking water.

In general, the quality of existing open sports and leisure spaces will only deteriorate in the future due to rising temperatures, the destruction of green spaces, and other abnormal weather events (flooding, hurricanes, fires). Therefore, when implemented, the results of the study (the main adaptive measures for the SLC network) allow visitors of these spaces to adapt to climate change. The expansion and research of a more accurate list of adaptive measures for the formation of a network of SLC in the structure of cities is the prospect of further scientific developments.

References

- [1] V.V. Shulyk, "Pro klimatychni umovy formuvannya systemy rekreatsinyoho obsluhovuvannya naseleння (na prykladi Poltav's'koyi oblasti)", *Tradysiyi ta novatsiyi u vyshchiy arkhitekturno-khudozhniy osviti*, Kharkiv: KSADA, no. 2, pp. 125-126, 1998.
- [2] V.V. Shulyk, "Metodolohichni osnovy formuvannya rekreatsinykh system v Ukrayini", dys. kand. arkh.: 18.00.01. Kharkiv State Technical University of Construction and Architecture. Kharkiv, 2008.
- [3] Skate Deluxe. History of skateboarding. [Online]. Available: <https://www.skatedeluxe.com/blog/en/wiki/skateboarding/history-of-skateboarding>. Accessed on: November 02, 2022.
- [4] A Brief & Basic History of Parkour. World Freerunning Parkour Federation. [Online]. Available: <https://wfpf.com/history-parkour>. Accessed on: November 02, 2022.
- [5] Skiroll – History of the rollerski in Italy. [Online]. Available: https://www.skiroll.it/storia/storia_english.htm. Accessed on: November 02, 2022.
- [6] Y. Zaslavsky, A. Shevchenko, "Chto takoye ekstremal'nyy samokat i pochemu on nabirayet populyarnost'", 2022. [Online]. Available: <https://www.championat.com/lifestyle/article-4649013-chto-takoe-kikskutering-i-kak-razvivaetsya-samokatnyj-sport.html>. Accessed on: November 02, 2022.
- [7] M. Orr, Y. Inoue, R. Seymour, and G. Dingle, "Impacts of climate change on organized sport: A scoping review", *WIREs Climate Change*, vol. 13(3), pp. 1-25, 2022. doi:

- 10.1002/wcc.760.
- [8] O.P. Boyko, *Kul'tura dozvillya u suspil'stvi ryzyku: monografiya*, State Higher Educational Institution "Ukrainian Academy of Banking", Sumy, Ukraine, 2011. [Online]. Available: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/50133/5/Boiko_%20Kultura_dozvillia.pdf;jsessionid=151861ADB A2E838ADB50BEFCED663ED0. Accessed on: November 04, 2022.
- [9] A. Bobrova, E. Hassai, I. Verbytskyi, M. Makuha, M. Mostova, M. Tsygryk, O. Aliyeva, O. Syrbu, and Y. Nazarenko, *Klimatychna (ne)spravedlyvist': vplyv zminy klimatu na vrazlyvi sotsial'ni hrupy v mistakh Ukrayiny*, 2020. [Online]. Available: [https://cedos.org.ua/pdf/%D0%9A%D0%BB%D1%96%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_\(%D0%BD%D0%B5\)%D1%81%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B5%D0%B4%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C.pdf](https://cedos.org.ua/pdf/%D0%9A%D0%BB%D1%96%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0_(%D0%BD%D0%B5)%D1%81%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B5%D0%B4%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C.pdf). Accessed on: November 04, 2022.
- [10] O. Shevchenko, *Otsinka vrazlyvosti do zminy klimatu: Ukrayina*, 2014. [Online]. Available: https://necu.org.ua/wp-content/uploads/ukraine_cc_vulnerability.pdf Accessed on: November 05, 2022.
- [11] Yak zmina klimatu vplyvaye na mista i shcho nam varto zrobyty vzhe zaraz. Kufer. [Online]. Available: <https://kufer.media/misto/vyzhyvut-tilky-prystosovani-yak-zmina-klimatu-vplyvaye-na-mista-i-shho-nam-varto-zrobyty-vzhe-zaraz/> Accessed on: November 05, 2022.
- [12] D. Shukman, *Climate change: Summers could become 'too hot for humans*, BBC News, 2020. [Online]. Available: <https://www.bbc.com/news/science-environment-53415298>. Accessed on: November 05, 2022.
- [13] W.O. Roberts, L.E. Armstrong, M.N. Sawka, S.W. Yeargin, Y. Heled, and F.G. O'Connor, "ACSM Expert consensus statement on exertional heat illness: recognition, management, and return to activity", *Current Sports Medicine Reports*, vol. 20(9), pp. 470-484, 2021. doi: 10.1249/JSR.0000000000000878.
- [14] M. Braubach, A. Egorov, P. Mudu, T. Wolf, C. Ward Thompson, and M. Martuzzi, "Effects of urban green space on environmental health, equity and resilience", *Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas*, pp. 187-205, 2017. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-56091-5_11. Accessed on: November 08, 2022.
- [15] A. Grundstein, N. Elguindi, E. Cooper, and M. Ferrara, "Exceedance of wet bulb globe temperature safety thresholds in sports under a warming climate", *Climate Research*, vol. 58(2), pp. 183-191, 2013. doi: 10.3354/cr01199.
- [16] Do pytannya pro hlobal'nu zminu klimatu. Bukovinian State Medical University. [Online]. Available: <https://www.bsmu.edu.ua/blog/3186-do-pitannya-pro-globalnu-zminu-klimatu/> Accessed on: November 08, 2022.
- [17] T. Kakamu, K. Wada, D.R. Smith, S. Endo, and T. Fukushima, "Preventing heat illness in the anticipated hot climate of the Tokyo 2020 Summer Olympic Games", *Environmental Health and Preventive Medicine*, vol. 22(1), p. 68, 2017. doi: 10.1186/s12199-017-0675-y.
- [18] M. Orr, "On the potential impacts of climate change on baseball and cross-country skiing", *Managing Sport and Leisure*, vol. 25(4), pp. 307-320, 2020. doi: 10.1080/23750472.2020.1723436.
- [19] M. Santamouris, N. Gaitani, A. Spanou, M. Salirai, K. Giannopoulou, K. Vasilakopoulou, and T. Kardomateas, "Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas – Design realization and results of the flisvos project", *Building and Environment*, vol. 53, pp. 128-136, 2012. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.01.022.
- [20] Adaptatsiya do zminy klimatu. Carpathian Institute of Development. Agency for Promotion of Sustainable Development of the Carpathian Region "FORZA", 2015.

[Online]. Available: http://www.forza.org.ua/sites/default/files/adaptation_climate_change_brochure_ua_screen_final.pdf Accessed on: November 11, 2022.

[21] Modelyuvannya vplyvu zminy klimatu na terytoriyi ukrayiny z vykorystannyam heoinformatsiynykh system. [Online]. Available: https://nupp.edu.ua/roboti/95_модель_змін Accessed on: November 11, 2022.

ПРО АДАПТАЦІЮ МЕРЕЖІ СПОРТИВНО-ДОЗВІЛЛЄВИХ КОМПЛЕКСІВ МІСТ УКРАЇНИ ДО ЗМІНИ КЛІМАТУ

Байбак Д.О., аспірантка,

diana.baybak@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3878-2194

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

Анотація. Кліматичні зміни, що відбуваються сьогодні в планетарному масштабі, стають викликами для усіх мешканців планети, в тому числі й для жителів українських міст. З погляду на ці обставини впровадження нових методів формування їх середовища, що відповідатимуть новим умовам, є вельми актуальним. У статті розглянуто вплив зміни клімату на рекреаційні простори українських міст в контексті розміщення наявних спортивно-дозвіллевих просторів та їх благоустрій. Також приділено увагу впливу температурно-вологісних характеристик рекреаційного середовища на результативність спортсменів та стан їх здоров'я.

Загалом в роботі виявлено та систематизовано позитивні та негативні наслідки зміни клімату для розвитку мережі спортивно-дозвіллевих комплексів та спортсменів. Основним фундаментальним наслідком є те, що спортивна активність на відкритому повітрі у періоди підвищеної температури навколишнього середовища може призвести спортсмена до теплового стресу. Це свідчить про те, що існуючі спортивно-дозвіллеві комплекси не є адаптованими до змін клімату. У роботі розглянуті наявні у світі практичні шляхи адаптації середовища міста до кліматичної зміни: система заходів з оповіщення населення про спеку та інформування населення про способи зміцнення імунітету; створення зеленої та водної інфраструктури міст і позаміських територій; такі заходи як системи об'єктивного моніторингу захворювань та збудників інфекцій, на які впливає зміна клімату, а також планування робіт з профілактики цих захворювань; забезпечення доступу населення до чистої питної води та здійснення контролю за дотриманням технології знезараження та очищення води. На основі цього аналізу надано низку пропозицій щодо впровадження адаптивних заходів при організації мережі спортивно-дозвіллевих комплексів в архітектурно-містобудівному аспекті. Прогнозується, що такі заходи допоможуть відвідувачам пристосуватися до кліматичних змін.

Надалі це дозволяє визначити підходи до формування перспективної мережі спортивно-дозвіллевих комплексів в структурі міст в нових умовах.

Ключові слова: українські міста, зміна клімату, результативність спортсменів, кліматична адаптація, мережа, спортивно-дозвіллевий комплекс.

Стаття надійшла до редакції 25.11.2022

FEATURES OF THE ADAPTATION OF THE URBAN ENVIRONMENT TO THE NEEDS OF THE CHILD

¹**Kyselova G.V.**, Senior lecturer,
kiselisa@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0398-6413

¹**Kyselov V.M.**, Senior lecturer,
maketlab@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3900-5744

¹**Lisova A.P.**, student,
annartist2001@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2731-8767

¹**Kalynka V.M.**, student,
kalinkavarvara@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5314-496X

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

Abstract. Children's architecture is a means of education and development of the necessary skills, harmonious physical growth and health of the child. In this regard, the architecture of children's facilities nowadays is understood as an independent factor of education, which has a direct connection with the initial educational process and comprehensive development of the child.

The purpose of the article is to consider the role of the architectural environment in the upbringing and development of the child's personality, its influence on the effectiveness of the educational process. To determine the means of architecture that affect the feelings, emotions, age and characteristic features of children, as well as to form methods of organization and planning of children's developmental and educational spaces.

Children's space is one of the main educational and developmental sources, which should arouse interest, joy and excitement, ensure a safe and comfortable stay. Today, the rapid development of media and information technologies affects the child's recreational and play space in a new way. Sounds, shapes, colors, materials and various factors determine the organization of the play space. With the development of technology in modern conditions, children's environments are constantly changing and taking on new forms. The old outdated methods of forming the playing space are no longer modern enough and do not meet the current requirements for the competent development of the child. A properly organized environment shapes the child's perception, encourages him to learn about the social and material world. From the point of view of doctors and psychologists, the playing environment is an integral part of a child's healthy development. The process of play is important at all stages of growing up. The architect is also a leading expert in creating a competent play environment for learning and raising a child. Properly organized space, shape, color, texture – all this forms the child's personality. It is important to maintain the balance of the game and the educational structure in the formation of the interior of the game environment.

As a result, global examples of children's developmental environments and existing ways of organizing educational and educational processes were analyzed, and architectural methods of the child's perception of the surrounding environment, which contribute to adaptation in space, were revealed.

The conclusion proves the importance of the influence of the architectural environment on children's behavior; the importance of forming the correct volumetric and spatial composition of the developing environment and creating a favorable environment for children.

Keywords: friendly city, children's urban space, game environment.

Introduction. The reverse side of urbanization in the form of densification of urban development, destruction of green areas, loss of social ties between residents of the same house or neighborhood, increased motorization stimulated the social demand of the city to transform its environment, increase

the degree of comfort and safety, accessibility of social facilities, social communications with people – both with adults and with children and young people. In connection with this, phrases such as "friendly urban environment", "benevolent urban environment", "city of harmonious development", "city suitable for life" and others are increasingly appearing in public rhetoric [1].

The space in which a child grows up has always had a significant meaning and influence on the formation of personality. The child perceives the surrounding world in his own way, and in the process of this perception, the future personality is formed. Thanks to the play space, the child gets to know not only himself, but also the people around him, learns to interact with the surrounding world. Children reproduce a picture of the world with the help of game action, and in this game they learn about life forms. Today, the rapid development of media and information technologies affects the child's recreational and play space in a new way. Sounds, shapes, colors, materials and various factors determine the organization of the game environment. With the development of technology in modern conditions, children's environments are constantly changing and taking on new forms. The past outdated methods of forming the playing space are no longer modern enough and do not meet the current requirements for the competent development of the child. Properly organized space, shape, color, texture - all this forms the child's personality. It is important to maintain the balance of the game and the educational structure in the formation of the interior of the game environment. A properly organized environment shapes the child's perception, encourages him to learn about the social and material world.

Analysis of recent research and publications. The scientific and methodological basis of the study was the work related to the justification of the concept of balanced development of cities and the development of appropriate methods and norms of urban planning, which are based on the results of research by such scientists as: Yu.M. Bilokon, M.M. Gabrel, V.L. Glazyryn, M.M. Demin, O.I. Yefimov, E.O. Smirnova, I.A. Ryabkova, B.S. Cherkes. The social situation of children's development and the influence of the environment on identity problems are devoted to the works of L.S. Vygotsky, D.B. Elkonina, H.M. Andreeva. Research related to the organization of entertainment and children's playgrounds in an urbanized environment was carried out by: G. Beltzig, M.Ya. Basov, L.S. Vygotsky, A.B. Zalkin, S. Solomon, M. Sudarsana, L. Tai, S. Talpaid, D.N. Uznadze, J. Frost, D. Hynes.

Relevance of research. The development of the child's brain occurs as a result of interaction with the environment, which is possible due to motor activity. If the volume of spontaneous movements in a child's life is sharply reduced, he finds himself in a risk group: his body and brain cease to cope with elementary everyday tasks.

Every year, the number of children with developmental disabilities and learning difficulties is increasing in the world; children begin to walk and talk later, learn self-care skills with difficulty; students do not cope with the elementary school curriculum. In recent decades, there have been negative changes in other areas of children's development as well: in the report of the World Health Organization for 2018, it is noted that every fifth child in the world aged 5 to 19 years is overweight or obese, physical activity is 80% children is recognized as insufficient.

If in adults, vestibular disorders are manifested primarily in the form of dizziness and disorientation, in children, congenital vestibular dysfunctions prevent the full development of the brain and lead to a delay not only in motor, but also in cognitive development. A child with such disorders faces a number of difficulties in life, which change with age, but do not disappear.

Research methodology. A problematic analysis of theoretical propositions in urban planning, sociology of cities and the perception of the urban environment through the eyes of a child was carried out. The empirical basis of the study was made up of the analysis of documentary sources – regulatory and legal documents, data from specialized periodicals, Internet publications, materials from information portals, and secondary analysis of research materials by other authors on the study of social space for children.

The aim of the study. Based on the analysis of the global experience of creating and adapting children's spaces in the city, give a clarification of the concept of "child-friendly city" and approaches to determining the quality criteria of children's urban environment.

Basic material. Everyday life of children takes place in specific physical spaces. Children's daily lives flow because children live in a stream of time that slips as they find other places. Time and place are central categories in the conceptualization of the transitory, ordinary nature of a child's everyday life [2, p. 155].

A child-friendly environment consists of many factors. It should correspond to the growth, weight and other parameters of the child's body; encourage interaction with nature and more movement; adapt equally well to the needs of a specific child and all children in general (Fig. 1). At the same time, the solutions can be different – from interior and architectural to management.

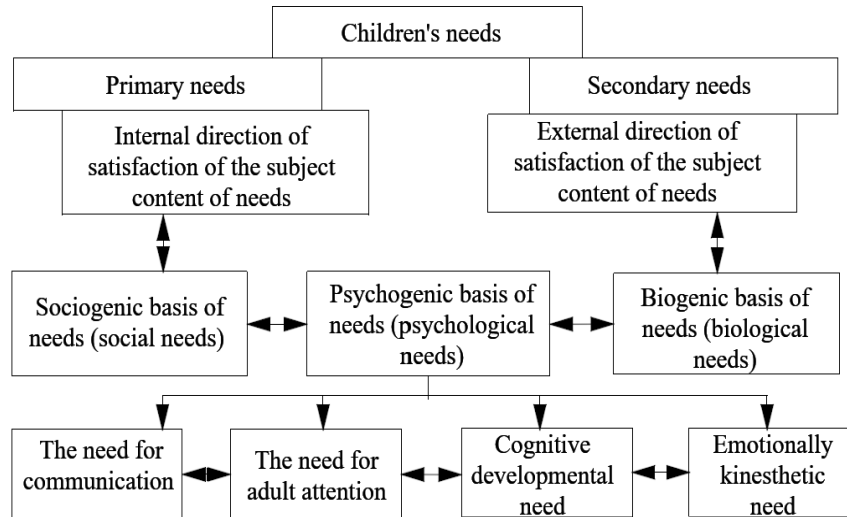


Fig. 1. Consume preschool kids

Playgrounds are not a set of random children's zones; they should complement each other from a neurodynamic point of view. Children will be able to move from yard to yard, and their development will be versatile [3, p. 30].

Any environment realizes itself through the level of design decisions, through the objects included in it as elements. The game environment includes: a playing field, game equipment, toys, game paraphernalia, game materials necessary for a child's game activity. In urban buildings, children "find everything already organized and adapted to the functional needs of adults" [4].

A child needs a choice of different game simulators to stimulate the vestibular, tactile, proprioceptive, auditory, and visual systems. When it comes to simulators that stimulate different types of motor activity, it is necessary to take into account the lack of equipment that allows you to include an element of risk in the game, which is very important for a child, especially for children over the age of 7. Children at this age are agile and inquisitive, they are overcome by a thirst for strong sensations. This feeling can be given by various options of complex rope "climbing houses" located at a height, or a strong but transparent tunnel between steel wire towers.

The creation of game landscapes, that is, the artistic modeling of the terrain, is performed by means of geoplastics using artificial rubber coatings, natural lawn and other building materials [5].

The use of horizontal, vertical and horizontal-vertical zoning methods allows you to highlight levels of difficulty for children of different ages. It was found that the complexity of the volumetric-spatial solution depends on the architecture of the public institution, which determines the constructive features of the children's environment. The generalization of foreign and Ukrainian design experience made it possible to distinguish the methods of environment formation: monovariant design (use of unchanged stationary equipment and integral subject content) and variant design (availability of three-dimensional objects and modules). The variety of design solutions is achieved thanks to the variant design method [6, p. 12].

On the terrace of the Marmara Forum shopping center in the Istanbul district, an ensemble of assembled white spheres invites children to climb, roll down a hill and relax in a forest of hammocks (Fig. 2). The project, known as Cloud Playground due to the bulbous shape of the structures that look like clouds hanging over the building, was designed by the Amsterdam studio Carve. The limited area and location of the space – at a height of 24 meters above the street level – became the starting point of the project for the architects. Instead of a horizontal extension of the playground, the Carve studio looked for vertical forms with significant volumes that children can explore from within [7].



Fig. 2. Playground in Istanbul, landscape studio Carve

The peculiarities and diversity of the formation of children's spaces are based on the "scenario" approach and associative interpretation to their design. When designing each specific zone in the children's center, first of all, "scenarios" should be taken into account: functional processes, activities, possible behavioral patterns inherent in adults and children in this space. For example, the interior of children's centers has several scenarios: 1. An educational institution with a profile specialization, such as urban economy, may have an image of the city and urban infrastructure – public transport, lighting, landscaping. It is not necessary to reflect the image of a particular city, it is possible to use conceptual architectural and artistic means, associative images of the city of the future or a magical city, a fairy-tale world. 2. On the other hand, if the institution does not have a certain specialization, it is necessary to create an interesting image that will reflect certain trends in the children's world – fairy tales, cartoons, etc. However, the peculiarity of such children's centers is not only to provide relevant services and ensure gender equality among adults and children, but also to play an educational role for the next generation. The educational role is to orient the specialized children's space to the living conditions – what their parents do, perhaps, what their future is connected with [8, p. 95].

Closeness to nature has a positive effect on people at any age and is especially beneficial for children. They are more sensitive to the environment. Architects of the Vietnamese bureau VTN Architects took this into account when designing a kindergarten in Bien Hoa. The roof of the building almost completely occupies the garden, where 500 pupils acquire the first skills of caring for the natural world (Fig. 3).

Here they are taught the basics of agriculture. Products grown on the farm are collected and sent to the kindergarten kitchen. The two-story building "rolled into a knot" is designed for 500 preschoolers aged 2 to 5 years. Energy-saving technologies are used in the construction, which means that the building does not take resources from the city's ecosystem, it gives them back [9].



Fig. 3. Kindergarten in Bien Hoa

Typical solutions are not suitable for children even within the same age and social group. Children are more willing to interact with a space that is more amenable to change. One of the successful examples of this approach is the playground designed by the British Bureau Assemble in the Architectural Gallery of the Royal Institute of British Architects (RIBA) (Fig. 4). The play space is created using colorful modules made of recycled polyurethane foam. The lightweight material makes it easy to move these elements and its surface is easy to clean.

The considered space of the play environment and the conditions for the formation of children's artistic outlook allow us to assert that the properties of the subject-spatial environment are not reduced only to the sum of the objects that make it up. Space contains a length, a real or imaginary measure, which can be explored through color sensation, through light, sounds, melody, the feeling of silence, the shape of an object, architectural space, natural landscape. Thus, we consider space (environment) as a way of immersing the child in the real actions of the environment through art, which allows children to develop imagination, diversity of impressions, thoughts [10, p. 203].

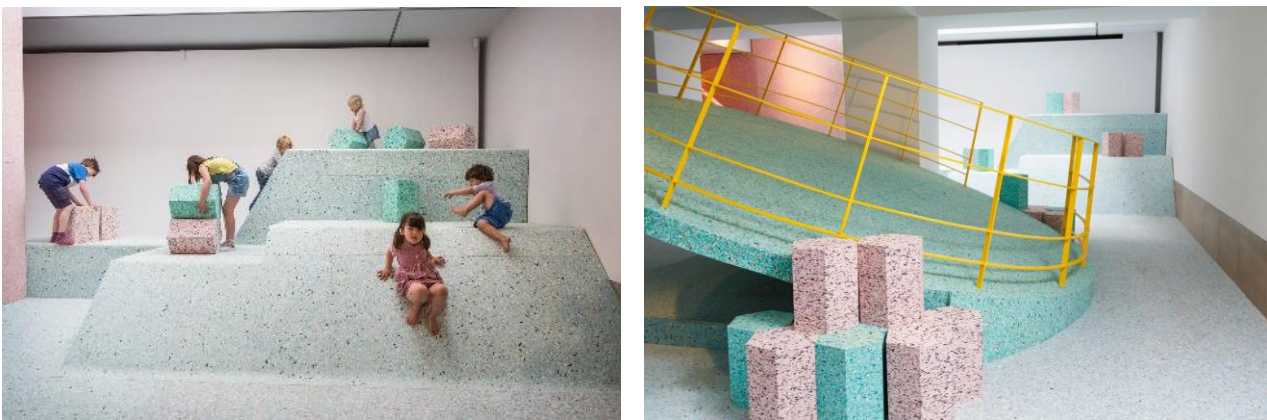


Fig. 4. Playground designed by British Bureau Assemble in the Architectural Gallery of the Royal Institute of British Architects (RIBA)

The game environment is a system of material objects of the child's activity that functionally model the content of his physical and spiritual development. It performs a responsible function, it encourages play, forms imagination and acts as a material center of the child's thought. The category "play environment" is understood as a part of the space that is already mastered and understandable for staying. "Even significant ensembles are designed as a kind of large-scale spatial design, and their functional content is designed as an independent design environment formed by engineering and technical components" [11].

Any element of the environment that stands out in the physical space is simultaneously in the material and mental realities. The comfort of the urban environment is determined by the presence

in it of elements and properties that give a person a sense of the necessary physical, psychological and social well-being, comfort [12].

Conclusion. A child-friendly city is a child-oriented city, it has space for safe and comfortable living of a child, it is equipped not only with children's infrastructure facilities, but also with spaces for independent children's mobility. It is also a city where children can participate in shaping the children's urban environment.

The main tasks in the adaptation of the urban environment to the needs of the child are to meet the interests and needs of the child, to ensure the development of the child, to implement their own initiatives, to make independent decisions, to develop creative abilities.

It can be concluded that comfortable conditions of the urban environment determine the formation of a specific system of values in the younger generation, while public institutions and the state of the urban environment largely determine the direction of socialization of the child. The problems of the influence of the urban environment on the personality, especially the personality of the child, remain poorly researched and difficult to solve. Further research in this area will improve the quality of the urban environment and develop proposals for the formation of a more child-friendly environment.

References

- [1] Deklaraciya ta plan dij. Svit, pridatnij dlya zhittya ditej. Rezolyuciya S-27/2 special'noi sesii General'noi Asamblei OON (May 10, 2002). Oficijna storinka OON. [Online]. Available: <https://www.un.org/ru/documents/declconv/declarations/worldchild.shtm>. Accessed on: October 23, 2022.
- [2] K. Rasmussen, "Places for children – Children's places", *Tanjong Malim: Childhood*, vol. 11(2), pp. 156–173, 2004.
- [3] O.I. Efimov, *Detskie ploshchadki budushchego. Nejrodinamicheskij podhod k sozdaniyu igrovyyh prostranstv v gorode*. Sankt-Peterburg: «INTEKO», 2021.
- [4] S. Chatterjee, "Children's friendship with Place: A Conceptual Inquiry", *Children, Youth and Environments*, no. 15(1), pp. 15–16, 2005.
- [5] Zakordonnij dosvid blagoustroyu teritorii dityachih majdanchikiv. [Online]. Available: https://studwood.net/1839665/nedvizhimost/zarubezhnyy_opyt_blagoustroystva_teritorii_detskih_ploshchadok. Accessed on: October 23, 2022.
- [6] YU.S. Bondarchuk, "Principi proektuvannya dityachogo igrovogo prostoru v zakladah gromads'kogo priznachennya", avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya k-ta. mistectvoznavstva.: 17.00.07, Harkivs'ka derzhavna akademiya dizajnu i mistectv. Har'kiv, 2017.
- [7] Zohra Khan, "Carve studio creates modular clouds as a unique playground for children in Istanbul", *STIR World*, no. 12. [Online]. Available: <https://www.stirworld.com/see-features-carve-studio-creates-modular-clouds-as-a-unique-playground-for-children-in-istanbul>. Accessed on: October 23, 2022.
- [8] H. Woolley, J. Dunn, C. Spencer, T. Short, and G. Rowley, "Children describe their experiences of the city center: a qualitative study of the fears and concerns which may limit their full participation", *Landscape Research*, no. 24, pp. 287-301, 1999.
- [9] "Dityachij sadok – proobraz arhitekturi majbutn'ogo". [Online]. Available: <https://sad.ukr.bio/ua/articles/7222/> Accessed on: October 23, 2022.
- [10] K. Korpela, *Children's environment*. Handbook of environmental psychology. New York: John Wiley and Sons, 2022.
- [11] "Detskie igrovye ploshchadki Velikobritanii". [Online]. Available: <http://tehne.com/node/5446>. Accessed on: October 23, 2022.
- [12] YU. S. Hristyuk, "Aspekti vzaemodii sistemi «ditina – dityache seredovishche – gromads'kij prostir»", *Visnik Harkivs'koï derzhavnoi akademii kul'turi*, vol. 3, pp.112-113, 2013.

ОСОБЛИВОСТІ АДАПТАЦІЇ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА ПІД ПОТРЕБИ ДИТИНИ

¹Кисельова Г.В., ст. викладач,
kiselisa@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0398-6413

¹Кисельов В.М., старший викладач,
maketlab@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3900-5744

¹Лісова А.П., студентка,
annartist2001@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2731-8767

¹Калинка В.М., студентка,
kalinkavarvara@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5314-496X

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

Анотація. Стрімке зростання міст, інтенсифікація міського життя, зникнення дітей з міських осіб та поміщення їх у захищені міські життєві простори у поєднанні з включенням молоді до міських процесів, подієвим наповненням міського середовища, увагою суспільства та держави до маломобільних груп городян – це та багато іншого підтримує невгасаючий дослідницький інтерес до міста.

В статті наголошується проблематика «дружності» міського середовища до дітей, адже інтенсивний соціально-економічний розвиток країни неможливий без зростання творчого та морального потенціалу її громадян, без розвитку їхньої активності, ініціативи, здібностей. Формування цих та цілого ряду інших якостей відбувається в основному в дитячі роки не тільки через цілеспрямовану роботу школи, установ додаткової освіти, але ще й активному використанні дітьми міського середовища: гра на дитячому майданчику, активна вільна дитяча мобільність та інше.

Багато дослідників відзначають існування у міському середовищі окремих безпечних ділянок для дітей – «острівців» захищеного та комфортного дитинства. У той же час, переміщення між такими «острівцями» буває досить небезпечно для дитини. Це викликає звуження просторів вільної дитячої мобільності. На активність дитячої мобільності впливає також непристосованість міських громадських просторів, а саме, відсутність велодоріжок, заповнення наявних вільних територій (наприклад, прибудинкових просторів) автотранспортом, необладнані дитячі майданчики, відсутність спортивних майданчиків.

Дитяча архітектура – це засіб виховання і розвитку необхідних навичок, гармонійного фізичного росту і здоров'я дитини. У зв'язку з цим архітектура дитячих об'єктів в наш час розуміється як самостійний фактор виховання, який має безпосередній зв'язок з початковим учбовим процесом і всестороннім розвитком дитини. Дитячий простір – одне з основних освітніх та розвиваючих джерел, які повинні викликати зацікавленість, радість та хвилювання, забезпечувати безпечне та комфортне перебування. З точки зору лікарів та психологів ігрове середовище – це невід'ємна частина здорового розвитку дитини. Процес гри важливий на всіх етапах дорослішання. Архітектор також є провідним фахівцем у формуванні грамотного ігрового середовища для навчання та виховання дитини.

Ключові слова: дружнє місто, дитячий міський простір, ігрове середовище.

Стаття надійшла до редакції 27.10.2022

CARBON FOOTPRINT OF A CONCRETE TRANSPORT STRUCTURE - A DEEP TUNNEL

¹**Karpiuk I.A.**, PhD., Assistant Professor,
irina.carpuyuk@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3437-5882

¹**Karpiuk V.M.**, Doctor of Engineering, Professor,
karpiukvim@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4088-6489

¹**Klymenko Ye.V.**, Doctor of Engineering, Professor,
klimenkoew57@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4502-8504

¹**Hlibotskyi R.V.**, postgraduate student,
romich.gl@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8730-5952
¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
st. Didrihson, 4, Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. The research object of this scientific work is the massive concrete structures of underground low-deep transport tunnels, reinforced with steel and non-metallic composite reinforcement. Circular-section tunnels with the frame nominal diameters of 5, 10 and 15 m are considered.

The subject of the research study is the assessment of the averaged carbon footprint in both types of the constructive solution throughout their entire life cycle. The presented research is due to the need to implement the European Climate Law (the European Green Agreement. At the same time the Paris Agreement (2016) recommends to stop producing and using carbon steel in construction by 2030. The ecological impact of both types of transport tunnels is expressed in the form of carbon footprint, as the equivalent of carbon dioxide emissions, which is calculated separately for each stage of their existence in accordance with the current European Codes, including the recommendations of the proprietary methodology.

To determine the required sizes of the tunnels concrete frames and their reinforcement, the numerical routine (B₃) experiment was carried out in PLAXIS software complex in accordance with the current regulations.

Averaged according to three different diameters and generalized carbon dioxide emissions during the life cycle of the reference structure (type 1) and proposed one (type 2) of the underground transport tunnel with the length of 1 m.p. were, respectively, 15.97 t CO₂ eq and 11.551 t CO₂ eq, i.e. decreased by almost 1.4 times.

The conducted research made it possible to analyze the carbon dioxide emissions into the atmosphere, to systematize the existing factors and impact factors of the specified building on the environment, and to determine the ways of their reduction. The possibility and expediency of using basalt-plastic reinforcement instead of steel in monolithic concrete structures, incl. transport tunnels, according to the criterion of reducing greenhouse gas emissions are proved.

Keywords: carbon footprint, carbon dioxide emissions, underground transport tunnel, monolithic heavy concrete, steel and non-metallic composite reinforcement, construction life cycle, stage, information group (module).

Introduction. In 2015, 193 UN member nations recognized the undisputed success of the Millennium Development Goals Program until 2015, adopted by the UN General Assembly in 2000, and the need to adopt a new agenda. At the beginning of August that year, they reached the consensus and adopted the final document "Transforming of our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development", which was approved at the UN Summit on September 25, 2015 with the final formulation of 17 global Sustainable Development Goals (SDG). Among them № 12 is ensuring the

rational models of consumption and production; № 13 is taking the urgent measures to combat climate change and its consequences.

The sustainable development concept of the world community appeared in the process of combining three main points of view: economic, social and environmental. It provides to adopt the measures aimed at the optimal use of limited resources and to apply ecological nature-, energy- and material-saving technologies for ensuring the stability of social and cultural systems, as well as the integrity of biological and physical natural systems.

In December 2019, the countries of the European Union defined 6 priorities of Sustainable Development (European Green Agreement) in Brussels. In particular, the European Climate Law sets the goal of achieving climate neutrality of the territory by 2050, and by 2030 – to reduce harmful emissions by at least 50 %.

Taking the above mentioned into consideration, it is obvious that in the construction industry, which is one of the most capital-intensive, it is vital to make innovative decisions to fulfill the global goals, in particular № 13 – to reduce harmful emissions of greenhouse gases and, first of all, CO₂ carbon dioxide.

Analysis of recent research and publications. Based on the available experience and analysis of the latest researches and publications, it is known that any construction object exerts its ecological impact on the environment throughout its entire life cycle. As a rule, everything begins with the production of raw materials and continues until the demolition of the structure, waste recycling for the secondary use and material recovering. According to [1], about 50 % of the total carbon dioxide emissions into the atmosphere are due to the activities of the construction industry. The reduction of energy consumption and the negative impact of construction on the modern ecosystem is provided by the directives [2, 3] and the diffusion [4] approved by the European Commission. They regulate the main principles of energy efficiency, environmental friendliness and economy in the construction industry. Their observance will ensure high energy efficiency, cost-effectiveness of buildings and structures with low values of carbon dioxide emissions and other greenhouse gases.

International green building standards of the latest generation [5–7] recommend to consider the greenhouse effect of harmful gases from any building or structure at the stage of their design.

The examination of harmful emissions from the construction and the arrangement of structures, the assessment of the impact of their main parameters on the environment are carried out by various scientists with the aim of finding optimal solutions and implementing them into the Building Code. Among them, it should be noted the work [8], in which there is the analysis of greenhouse gas emissions in construction, software and computer evaluation of their effects, data on carbon emissions of construction materials and products.

The research work [9] provides data on the environmental impact of 20 individual buildings and established criteria for its evaluation, and the suggestions for its simplification are made. The study [10] proposes the analytical method for calculating the carbon content of a building object. However, it does not take into account carbon dioxide emissions during its demolition work and waste recovery.

The academic paper [11] provides the method for calculating greenhouse gases from individual residential buildings, which takes into account various stages of their life cycle, from raw material production to waste recovery. At the same time, the emissions from their assembly are not taken into account.

Scientific works [12, 13] describe the parametric studies results of concrete reuse and carbon steel component materials after reinforced concrete structures recovery which life cycle has ended.

Among the home studies the pioneering works [14, 15] should be highlighted, in which the analysis of the construction impact on the environment was made, with the methodology development and the carbon footprint assessment of a multi-story hybrid wooden and reinforced concrete building. Two types of 15-story building with reinforced concrete and hybrid framework made of glued timber and reinforced concrete rigid core are considered. The use of hybrid structural system instead of reinforced concrete made it possible to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere by 3.7 times and confirms its effectiveness.

In summary it should be emphasized that despite the achievements of science and the world

community's awareness of the possible catastrophic consequences of the global environmental crisis associated with harmful emissions of carbon dioxide and other greenhouse gases into the atmosphere, the certain measures for their radical reduction are still being planned in the modern construction industry, in particular in design. In addition, almost half of the time allotted for the implementation named by SDG has already passed... However, it is obvious that the environmental requirements are neglected at most modern local construction sites, starting from the design stage. So **the purpose of this work** is to demonstrate the necessity and expediency of the system approach and methodology [2–5, 16] to determine the carbon footprint throughout its life cycle in order to find the ways to reduce it using a specific example of the underground transport tunnel.

Research tasks:

– to systematize the existing factors and negative environmental impact factors of the specified tunnel on the environment;

– to improve the existing methodology [14–16] for estimating of carbon dioxide emissions into the atmosphere by determining the carbon footprint in the form of CO₂ equivalent during the construction interacting with the foundation soils;

– to prove the technical functionality and the ecological expediency of steel replacing with basalt-plastic reinforcement in monolithic concrete structures of deep transport tunnels according to the criterion of reducing greenhouse gas emissions into the atmosphere.

Research methodology. The assessment of the material impact of the main load-bearing structures on the carbon footprint of the underground transport structure was carried out on the example of three underground transport tunnels with different diameters (Fig. 1). The main load-bearing elements of the tunnels are monolithic concrete frameworks with the annular cross-section, the horizontal disks of surfaces for vehicles, which rest on the external annular frameworks at the edges, and in the middle part – on the longitudinal walls-partitions, with steel (standard reference modification) and non-metallic composite (BFRP) reinforcement (proposed modification). The construction of the tunnels is planned to be carried out using the proven shield method in medium-hard rock by excavating the soil with a tunneling machine and arranging the tunnel frame behind it.

Analytical and numerical methods of finite elements using PLAXIS software complex were used to determine the internal forces in the tunnels frames and possible ground subsidence during their construction. Three-factor three-level numerical experiments were implemented according to Box-Benkin B₃ plan, which is based on planning theory.

In these modifications the tunnels have nominal (median surface) diameters of 5.10 and 15 m (X₁ factor), which are located, respectively, at the depths of 20.0; 22.5 and 25.0 m to their horizontal axis from the ground surface (X₂ factor including the level of underground water). The geological cross-section is typical for the southern region of Ukraine. It is characterized by the presence of four main layers (X₃ factor – the type of soil conditions). The upper layer with the thickness of 13 m consists of loess loam the stiffness of which increases linearly with the depth. Under the layer of loam there is the layer of fine-grained sand with the thickness of 2.0 m which was used as a bearing layer for the piles of the ancient building – the monument of architecture and urban planning (probably larch timber). Uneven settlement of these piles during and after the installation of the mentioned tunnels is extremely undesirable for the landmark.

Below the sand layer there is a deep layer of red and brown loams and clays with the thickness of 5.0, respectively; 7.5 and 10.0 m. This is one of the layers where the upper part of the tunnel is erected. And its lower part is placed in a deep layer of shelly limestone of the Pontic layer with the inclusions of recrystallized shelly limestone in its covering. This layer is rather hard so only 5 m of this layer is included in the finite element model. The distribution of pore water pressure is hydrostatic. The groundwater level can be at the depths of 3.9 and 15 m (X₂ factor) below the ground surface, i.e. at the mark $y = 0$ in PLAXIS software complex.

Since the tunnels frame are also soil: the layering is more or less symmetrical with respect to the vertical axis of the tunnel, only one (right) half of their framing and the soil base was taken into account in the considered models of plane deformation. In the horizontal direction, the design soil model extended 33, 39, and 45 m, respectively.

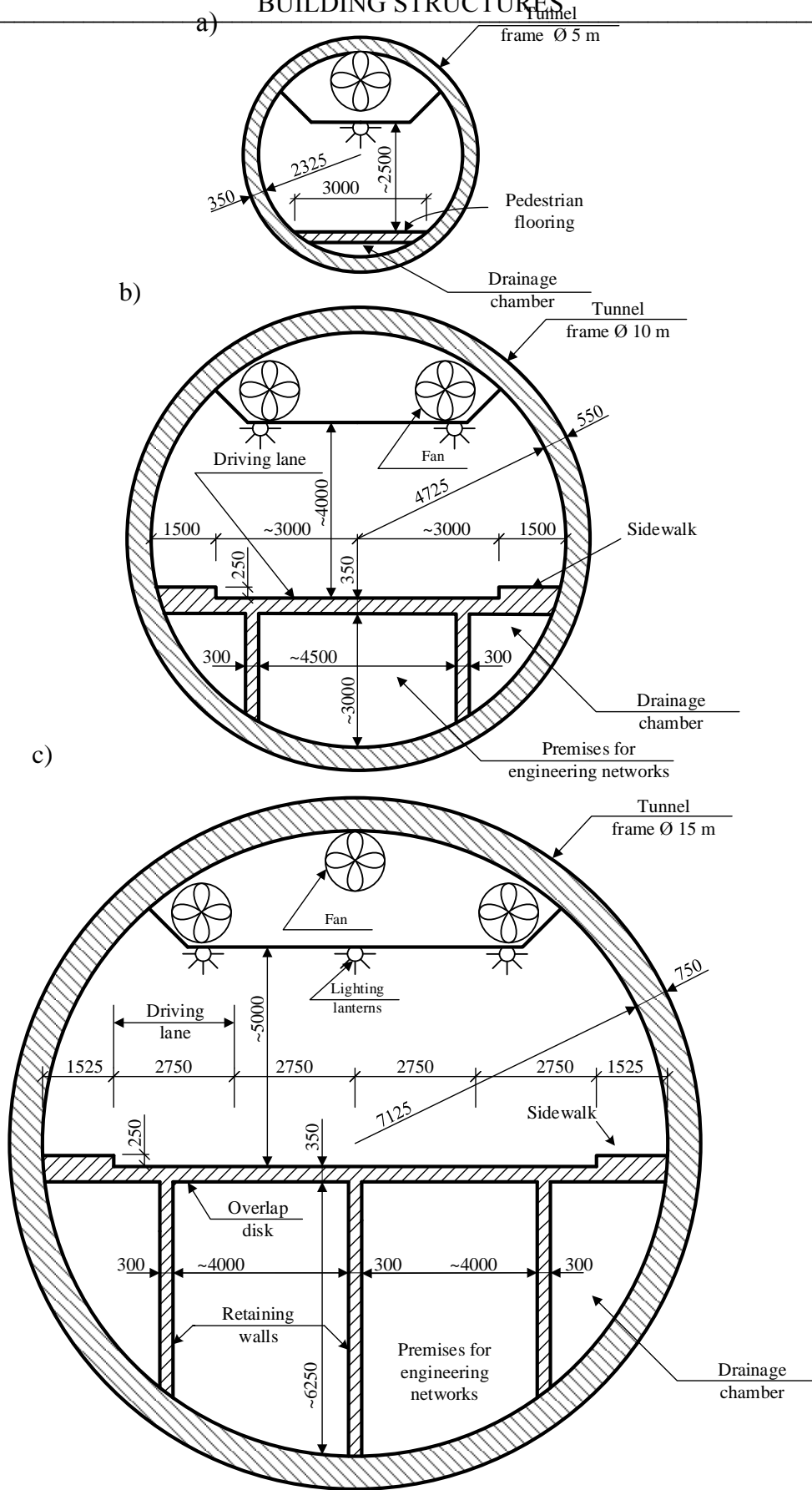


Fig. 1. The main load-bearing structures of transport tunnels with the diameters 5 m (a), 10 m (b), 15 m (c)

Research results. *Environmental impact assessment of the life cycle of any building structure.* The scientific research in this branch shows that carbon footprint should be expressed in terms of carbon dioxide equivalent, and its assessment for a specific building structure should consider all the emissions that happen not only during the useful life. At the same time, it is necessary to take into account any possibility of reusing or processing of constituent elements and materials after its demolition.

For analyze convenience of the calculated environmental indicators it is advisable to organize and record the obtained data according to the stages of the life cycle listed in Table 1.

Table 1 – Stages of the useful life cycle of the structure and the components

| Useful life cycle of the structure | | | |
|---|------------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Pre-operational stage | | Operational stage | Completion of the life cycle |
| Extraction and transportation of raw materials | Installation and construction work | Operation | Demolition |
| | | Service | |
| Production of materials and components | | Renovation | Destruction |
| | | Replacement | |
| Additional information that does not belong to the life cycle of the structure: | | | |
| – external impact beyond the building structure; | | | |
| – reusing, processing, recycling. | | | |

According to the recommendations of the European Standard [16], researches [14, 15], the considered groups of the life cycle of the building are presented in the form of a modular system (Table 2), which takes into account all its stages, divided into separate information groups, which are sometimes intertwined.

Table 2 – Characteristics of the information modules and the stages of buildings life cycle formed by them according to [16]

| Life cycle stage | Information group (module) | Process |
|---|----------------------------|-------------------------------------|
| Pre-operational stage | A1 | Supply of raw materials |
| | A1 | Transportation |
| | A3 | Production |
| Construction stage | A4 | Transportation |
| | A5 | Construction works |
| Operational stage | B1 | Operation |
| | B2 | Maintenance |
| | B3 | Repair |
| | B4 | Replacement |
| | B5 | Major repair |
| | B6 | Energy use |
| | B7 | Water use |
| The stage of the life cycle completion | C1 | Demolition |
| | C2 | Transportation |
| | C3 | Waste processing |
| | C4 | Destruction |
| Benefits and burdens outside the system | D | Potential for reusing and recycling |

The conducted studies [14–16] establish that the results of the emissions assessment during the life cycle should be presented in the form of CO₂ carbon dioxide equivalent (kg CO₂ eq) for each stage (Table 3).

Table 3 – Before the carbon dioxide emissions assessment during the building life cycle

| Life cycle stage | Measurement units of carbon footprint assessment results |
|-------------------------------------|---|
| A1 – A5 B1 C1 – C4 D1 – D2 | kg CO ₂ eq/m ² of useful internal area of any building or structure |
| B2 – B7 | kg CO ₂ eq/m ³ of useful internal volume of any building or structure |

The carbon footprint assessment of buildings and structures during their life cycle.

According to the recommendations [14–16], in the building made of several parts, it is advisable to calculate the carbon footprint from carbon dioxide emissions during the entire life cycle using the expression:

$$CF = CF_{A1-A3} + CF_{A4-A5} + CF_{B1-B7} + CF_{C1-C4} - CF_{D}, \quad (1)$$

where CF – the estimated amount of carbon dioxide emissions during the entire life cycle;

CF_{A1-A3} – the estimated amount of emissions at the pre-operational stage;

CF_{A4-A5} – the estimated amount of emissions at the construction stage;

CF_{B1-B7} – the estimated amount of emissions at the stage of operation;

CF_{C1-C4} – the estimated amount of emissions at the completion stage of life cycle;

CF_{D} – the estimated amount of emissions beyond the structure life cycle.

The components of formula (1) are calculated as the sum of estimated emissions for the its building element for each information group from Table 2. There are:

$$CF_{A1-A3} = \sum CF_{A1,i-A3,i}, \quad (2)$$

$$CF_{A4-A5} = \sum CF_{A4,i} + \sum CF_{A5,i}, \quad (3)$$

$$CF_{B1-B7} = \sum CF_{B1,i} + \sum CF_{B2,i} + \sum CF_{B3,i} + \sum CF_{B4,i} + \sum CF_{B5,i} + \sum CF_{B6,i} + \sum CF_{B7,i}, \quad (4)$$

$$CF_{C1-C4} = \sum CF_{C1,i} + \sum CF_{C2,i} + \sum CF_{C3,i} + \sum CF_{C4,i}, \quad (5)$$

$$CF_{D} = \sum FC_{D,i}, \quad (6)$$

where i – the number of the component or building element.

Carbon dioxide emissions during the production of "simple" monomaterials (extraction, transportation and processing of raw materials) are determined by multiplying their mass by the reduction coefficients of carbon equivalents:

$$CF_{A1,i-A3,i} = V_i \cdot \rho_i \cdot k_{mat,i}, \quad (7)$$

where V_i – the volume of the i -th material for the manufacture of building elements;

ρ_i – the density (thickness) of its material;

$k_{mat,i}$ – the reduction coefficients of greenhouse gas (carbon dioxide) emissions.

Carbon dioxide emissions during the manufacture of "complex" components made of different materials (for example, facade systems, solar panels, etc.) are determined using the environmental impact statement results of the products by the manufacturer or using the data of a close analogue by introducing one or another reduction coefficient:

$$CF_{A1,i-A3,i} = Q_i \cdot k_{red,i} \cdot k_{ref,mat,i}, \quad (8)$$

where Q_i – the number of units of a complex component (for example, the total volume or area);

$k_{red,i}$ – the reduction coefficient;

$k_{ref,mat,i}$ – the reduction coefficient of carbon dioxide emissions to the analogue.

Carbon emissions during the transportation from the manufacturing plant to the construction site (information group A4) are calculated by multiplying the mass of the corresponding element (M_i) by the transportation distance (L_i) and by the reduction coefficient ($k_{tr,i}$) of emissions of the specified gas, considering the type of transport:

$$CF_{A4,i} = M_i \cdot L_i \cdot k_{tr,i} \quad (9)$$

The arrangement of a structure or the construction of a building (information group A5) is a complex process, during the implementation of which many techniques, equipment and devices are used, as well as data from another similar project. All considered:

$$CF_{A5,i} = A_{tot} \cdot k_{constr} \quad (10)$$

where A_{tot} – the total useful area of the building;

k_{constr} – the coefficient of carbon dioxide emissions per m^2 of the total internal area of a similar building.

At the stage of preliminary design the experts recommend using approximate data of similar projects with the use of appropriate coefficients k_{constr} . So the volumes of carbon emissions during the estimated operation period (information group B1) are determined:

$$CF_{B1,i} = V_{tot} \cdot k_{constr} \quad (11)$$

where V_{tot} – the construction volume of the building.

The emissions caused by the operations related to the maintenance (B2) are recommended to be calculated using the expression:

$$CF_{B2,i} = n_m \cdot T_{op} \cdot Q_i \cdot k_{m,i} \quad (12)$$

where n_m – the number of maintenance operations of the building during the year;

T_{op} – the estimated period of building operation;

Q_i – the number of the units of the corresponding components (for example, the area of windows, facades, etc.);

$k_{m,i}$ – the coefficient of carbon dioxide emissions for the maintenance of the i -th component.

Similarly, the emissions of the specified gas during repair work are determined (module B3):

$$CF_{B3,i} = n_{rep} \cdot T_{op} \cdot Q_i \cdot k_{rep,i} \quad (13)$$

where n_{rep} – the number of maintenance operations during the year;

$k_{rep,i}$ – the emission factor CO_2 during the maintenance (repair) of its components.

The emission assessment according to the information groups B4 and B5 in the process of replacing some elements or major repairing of the structure includes the emissions caused by the production of materials necessary for the implementation of the modules B4 and B5 (information groups A1 – A3), their transportation and the execution of construction work (modules A4 and A5):

$$CF_{B4,i} = n_{repl} \left(\sum CF_{A1,i-A3,i}^{repl} + \sum CF_{A4,i}^{repl} + \sum CF_{A5,i}^{repl} \right); \quad (14)$$

$$CF_{B5,i} = n_{refurb} \left(\sum CF_{A1,i-A3,i}^{refurb} + \sum CF_{A4,i}^{refurb} + \sum CF_{A5,i}^{refurb} \right), \quad (15)$$

where n_{repl} , n_{refurb} – accordingly, the number of replacements and major repairing during the service life;

$CF_{A1,i-A3,i}^{repl}$, $CF_{A1,i-A3,i}^{refurb}$ – the total emissions during the production of necessary materials for replacement of elements or major repairs;

$CF_{A4,i}^{repl}$, $CF_{A4,i}^{refurb}$ – the total emissions during transportation of necessary materials for replacement and major repairs;

$CF_{A5,i}^{repl}$, $CF_{A5,i}^{refurb}$ – the total emissions when using the necessary materials in the process of construction works for replacement and major repairs.

The total amount of emissions at the end of the life cycle is calculated using the expression:

$$FC_{1-C4} = A_{tot} \cdot k_{dem} + (M_{w,r} + M_{w,lf}) \cdot L \cdot k_{tr} + M_{w,lf} \cdot k_w, \quad (16)$$

де $M_{w,r}$ – the weight of the construction waste that is suitable for processing and reuse;

$M_{w,lf}$ – the weight of construction waste that must be buried;

L – the distance from the construction site to the processing plant or to waste burial sites;

k_w – the coefficient of carbon dioxide emissions when processing or waste burying.

The materials obtained after processing can be used for the further arrangement of a similar structure or building. The expediency consideration of the following use of the specified materials is carried out according to the following formula:

$$FC_{\Pi,i} = \sum FC_{A1,i-A3,i}^{recycled}, \quad (17)$$

where $FC_{A1,i-A3,i}^{recycled}$ – the total emissions of carbon dioxide during extraction, transportation and production of i-th processed material.

Average emissions of carbon dioxide per 1 m.p. of buildings. The average carbon emissions during the estimated operation period of both construction types (module B1) are 1312 t CO₂ eq per 1 m.p. of the tunnels, which include the emissions during air conditioning, heating, cooling, water supply, drainage, lighting for the accepted energy efficiency class B. At the same time, the carbon emission factor was taken as for electric energy $K_{CO_2} = 420\text{g/kWh}$ in accordance with the recommendations [14, 15] and others.

The underground transport deep-level tunnels belong to the structures that cannot be dismantled because it is associated with uncontrolled subsidence and movement of soil masses. Therefore, CO₂ carbon dioxide emissions were not carried out for this information group (C1).

The emissions of CO₂ carbon dioxide during the transportation of the construction waste (module C2) and during their burial (information group C3) are not determined in the work due to their small amount.

The carbon emissions according to the D module, which could be formed during the materials processing of the destructed building and their reuse (recycling), are not considered in this work for the reason mentioned above.

Summarizing the above, according to three important and most widespread transport tunnels with nominal diameters of their middle surfaces of 5, 10 and 15 m and the length of 1 m.p. the averaged carbon footprint of the standard reinforced concrete (reference) structure is 15.977 t CO₂ eq, and the basalt concrete (proposed structure) is 11.551 t CO₂ eq, which is approximately 1.4 times less than the reinforced concrete one. Therefore, the largest emission reduction occurs at the pre-operational stage during the production and use of basalt plastic (BFRP) non-metallic composite reinforcement instead of steel.

It is obvious that at the operational stage, the carbon dioxide emissions can be significantly reduced also at the major repair (module B5) and replacement (module B4) of structural part with steel reinforcement, which received significant damage due to its corrosion on a monolithic concrete section of the structure with non-metallic composite reinforcement, for example, basalt plastic.

Conclusions:

1. The performed analysis of CO₂ carbon dioxide emissions into the atmosphere made it possible to systematize the existing factors and the factors of the negative environmental impact of the building, which are characterized by the processes from the extraction of raw materials for the production of the necessary materials to its destruction with the reuse of the obtained materials and recycling.

2. In accordance with the requirements of current European standards [16], the adapted and improved estimating methodology of carbon dioxide emissions into the atmosphere (carbon footprint in the form of CO₂ equivalent), which takes into account all the stages of the building life cycle and the possibility of reusing the obtained materials after its dismantling (recycling).

3. The technical feasibility and ecological expediency of basalt plastic reinforcement (BFRP) instead of steel in monolithic concrete structures of deep-level transport tunnels according to the

criterion of greenhouse gas emissions reducing into the atmosphere have been revealed. At the same time, the averaged carbon footprint 1 m.p. for three different diameters of the specified building is in the proposed version of the structure was 11.551 t CO₂ eq against 15.977 t CO₂ eq in the traditional (reference) version of the reinforced concrete structure, so it decreased by approximately 1.4 times. The specified CO₂ emissions can be reduced by almost 25 % during the repair or replacement of the horizontal road blocking and its supporting structures due to the use of non-metallic BFRP reinforcement instead of steel and recycling of materials.

References

- [1] F. Pacheko–Torgal, *Ekologichno efektyvne budivny`cztvo, budivli ta materialy`*, 2014, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1533/9780857097729.1>. Accessed on: October 19, 2022.
- [2] Consolidated text: Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/2018–12–24>. Accessed on: October 19, 2022.
- [3] Consolidated text: Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC (Text with EEA relevance). [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/27/2020-01-01>. Accessed on: October 19, 2022.
- [4] Environment. [Online]. Available https://environment.ec.europa.eu/index_en. Accessed on: October 19, 2022.
- [5] Healthy highly efficient, cost-saving green building. [Online]. Available: <https://leed.usgbc.org/> Accessed on: October 19, 2022.
- [6] BREEAM. [Online]. Available: <https://www.breeam.com/> Accessed on: October 19, 2022.
- [7] DGNB. Europe`s biggest network for sustainable building. [Online]. Available: <https://www.dgnb.de/en/index.php>. Accessed on: October 19, 2022.
- [8] De Vol'f K., F. Pomponi, A. Monkaster, "Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice", *Energiya ta budivli*, vol. 140, pp. 68-80, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.075>.
- [9] B. Sust–Verdager, S. Llatas, A. Garsia–Martines, "Simplification in life cycle assessment of single-family houses: A review of recent developments", *Building and Environment*, vol. 103, pp. 215-227, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.014>
- [10] E. Resch, C. Lausset, H. Brattebø, I. Andresen, "An analytical method for evaluating and visualizing embodied carbon emissions of buildings", *Building and Environment*, vol. 168, 106476, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106476>
- [11] A.M. Moncaster, K.E. Symons, "A method and tool for 'cradle to grave' embodied carbon and energy impacts of UK buildings in compliance with the new TC350 standards", *Energy and Buildings*, 66, pp. 514-523, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.046>.
- [12] L.C.M. Eberhardt, H. Birgisdottir, M. Birkve, "Potential of Circular Economy in Sustainable Buildings", *IOP Conference Series: Materials Sci. and Engineer.*, vol. 471, 092051, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/9/092051>.
- [13] F.N. Rasmussen, M. Birkved, H. Birgisdóttir, "Upcycling and Design for Disassembly – LCA of buildings employing circular design strategies", *IOP Conference Series: Earth and Environ. Sci.*, vol. 225, 012040, 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012040>.
- [14] S. Shekhorkina, M. Savytskyi, Y. Yurchenko, O. Koval, "A methodology for carbon footprint assessment of buildings", *Environmental Problems*, vol. 5, no. 3, pp. 174–178, 2020.
- [15] S.Ye. Shekhorkina, "Ocinka vuglecevoogo slidu bagatopoverxovoyi gibry`dnoyi derevo–zalizobetonnoyi budivli", *Naukovy`j visny`k povsyakdennya*, no. 3 (101), pp. 121–127, 2020.
- [16] European standards. [Online]. Available: https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/european-standards_en. Accessed on: October 19, 2022.
- [17] Y .A. Karpyuk, V.M. Karpyuk, *Raschet obdelok tonnelej y` gory`zontal`nykh vyrabotok* (monografiya). Odesa: Redakcijnno–vy`davny`chy`j viddil ODABA, 2016.

- [18] V.M. Karpyuk, A.Y. Menejlyuk, Y.A. Karpyuk, A.V. Surdu, "Obobshhennaya ocenka vly`yany`ya konstrukty`vnykh faktorov y` faktorov vneshnego vozdejstvy`ya na vnutrenny`e usyly`ya v zhelezobetonnykh obdelkax tonnelej", *Suchasni tekhnologiyi, materialy` i konstrukciyi v budivny`cztvi : naukovo-tekhnichny`j zbirny`k*, no. 2 (17), pp. 103-112, 2014.
- [19] D. Chen, M. Syme, S. Seo, W.Y. Chan, M. Zhou, S. Meddings, *Development of an Embodied CO₂ Emissions Module for Accurate*. Melbourne: Forest & Wood Products Australia, 2010. https://www.fwpa.com.au/images/marketaccess/PNA161-0910_Research_Report_Accurate_Module_0.pdf.
- [20] Z.S. Moussavi Nodoushani, A. Akbarnezhad, "Effects of structural system on the life cycle carbon footprint of buildings", *Energy and Buildings*, vol. 102, pp. 337-346, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.044>.

ВУГЛЕЦЕВИЙ СЛІД БЕТОННОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СПОРУДИ–ТУНЕЛЮ ГЛИБОКОГО РОЗТАШУВАННЯ

¹Карпюк І.А., к.т.н., доцент,
irina.carpyuk@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3437-5882

¹Карпюк В.М., д.т.н., професор,
v.karpiuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4088-6489

¹Клименко Е.В., д.т.н., професор,
klimenkoew57@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4502-8504

¹Глібоцький Р.В., аспірант,
romich.gl@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8730-5952

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

Анотація. Об'єктом дослідження даної роботи являються масивні бетонні конструкції підземних транспортних споруд-тунелів глибокого розташування, армовані сталеву і неметалевою композитною арматурою. Розглядаються тунелі кільцевих перерізів з номінальними діаметрами 5, 10 і 15 м їхніх опор.

Предметом дослідження є оцінювання усередненого вуглецевого сліду в обох варіантах конструктивного вирішення споруд на протязі всього їхнього життєвого циклу. Представлені дослідження зумовлені необхідністю виконання Європейського закону про клімат (Європейської зеленої угоди. При цьому, у Паризькій угоді (2016 р.) рекомендовано перестати виробляти і використовувати у будівництві вуглецеву сталь до 2030 року. Екологічний вплив обох варіантів транспортних тунелів виражений у вигляді вуглецевого сліду, як еквіваленту викидів вуглекислого газу, який обчислюється окремо для кожної стадії їх існування згідно чинних Європейських Норм з урахуванням рекомендацій авторських методик.

Для встановлення необхідних розмірів бетонних опор тунелів та їх армування був реалізований числовий планований (В₃) експеримент в ПК "PLAXIS" згідно чинних норм.

Осереднені за трьома різними діаметрами та узагальнені викиди вуглекислого газу протягом життєвого циклу еталонної (варіант 1) і запропонованої (варіант 2) конструкції підземної транспортної споруди-тунелю довжиною 1 м.п. становили, відповідно, 15,97 т СО₂екв і 11,551 т СО₂екв, тобто зменшилися майже в 1,4 рази.

Виконані дослідження дозволили зробити аналіз викидів вуглекислого газу в атмосферу, систематизувати наявні чинники і фактори впливу зазначеної споруди на довкілля та визначити напрямки їх зменшення. Доказана можливість та доцільність використання базальтопластикової арматури замість сталеву у монолітних бетонних конструкціях, в т.ч. транспортних тунелів, за критерієм зменшення викидів парникових газів.

Ключові слова: вуглецевий слід, викиди вуглекислого газу, підземний транспортний тунель, монолітний важкий бетон, сталеву і неметалева композитна арматура, життєвий цикл споруди, стадія (етап), інформаційна група (модуль).

Стаття надійшла до редакції 18.11.2022

ANALYTICAL METHOD FOR CALCULATING ANNULAR PLATES ON A VARIABLE ELASTIC BASE

¹**Surianinov M.H.**, DSc., Professor,
sng@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0003-2592-5221

¹**Krutii Y.S.**, DSc., Professor,
yurii.krutii@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7105-3087

¹**Karnaukhova A.S.**, PhD, Associate Professor,
karnauhovaanna@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3542-4300

¹**Klymenko O.M.**, Graduate student,
bolshajaakula@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7445-6057
¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
Didrikhsona str, 4, Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. The paper considers the application of the method of direct integration to calculations of annular plates and slabs on a continuous variable elastic base. Ring-shaped plates with variable geometric and mechanical parameters are increasingly used. Not only the elastic base, but also the plate thickness and cylindrical stiffness can be variable parameters here. The need for an analytical method for calculating such structures raises no doubts, since it makes it possible to evaluate the accuracy of finite-element analysis. To date, there are no proposals in the literature regarding a general analytical method for the calculation of annular plates on a variable elastic base.

A detailed description of the algorithm of the direct integration method is not given in the paper, and all the calculation formulas for the annular plate are taken from the authors' already published article. The results of numerical implementation of this algorithm for specific examples are considered: a concrete plate, which is rigidly pinch on the inner contour, and its outer contour is free, and a steel plate, which is rigidly pinch on the outer contour, and its inner contour is free.

To estimate the results of calculation by the author's method, computer modeling of the considered structures in PC LIRA-SAPR and their calculations by the finite-element method have been executed.

The foundation reaction is described by Winkler model with a variable bedding factor. In the first case a bed factor is assumed constant, and in the second case it changes under the linear law. Calculations have shown that discrepancy between deflections calculated by the finite-element method and the author's method does not exceed 1 %, and the results of radial and circumferential moments calculation differ more considerably, amounting to 10 %. The authors explain this difference by the inaccuracy of the numerical analysis associated with the semi-automatic method of constructing a finite-element mesh, which should be made finer. The densification of the mesh in the manual mode of its partitioning significantly reduces the discrepancy between the results of calculating the deflections, radial and circumferential bending moments by the finite-element method and the author's method.

Keywords: direct integration method, annular slab, elastic foundation, Winkler model, variable bedding factor, finite element method, PC LIRA-SAPR.

Introduction. Ring-shaped plates with variable geometric and mechanical parameters are increasingly being used. Variable parameters here may be not only the elastic basis, but also the plate thickness and cylindrical stiffness.

However, in spite of the considerable number of studies devoted to plate bending, their absolute majority is related to plates which have constant parameters, and only some authors consider variable parameters. Studies of plates of variable stiffness (thickness) predominate among such works. A number of questions in the theory and practical calculations of variable thickness

plates remain unresolved. Of great interest is the development of analytical methods of calculations.

Recent research analysis. A relatively small number of works [1-3] are devoted to the study of the neo-symmetric bending of a flexible plate on an elastic basis. The approach based on the symbiosis of the orthogonal polynomial and Ritz methods proposed in [2] by S. V. Bosakov. The results were obtained for the case of a concentrated force eccentrically applied to a circular plate lying on an elastic half-space. Generalization of this solution makes it possible to obtain a solution for an arbitrary load acting on a circular or circular plate.

The authors of [4] believe that the two-parameter elastic base model demonstrates a more realistic ground reaction behavior than the one-parameter Winkler model. Circular plates are modeled as a set of individual beam elements connected together in the radial and tangential directions. As a numerical method, the grid method has been applied.

In the thesis of E. R. Telegulova [5] obtained an analytical solution of the problem of determining the ultimate load for a circular in plan reinforced concrete plate, which lies on an elastic basis (Fuss-Winkler model).

B. B. Grosman in [6] presents the results of studies of antisymmetric deformation of circular plates of constant cross-section, made of orthotropic and isotropic material, which lie on an elastic basis, the properties of which are described by the Winkler model.

From the works of foreign authors, we note the article [7], the basis of which was a design work that requires less rigid treatment of circular plates than it is possible on the basis of standard formulas. The issues of dynamics are considered. The transfer matrix method used here allows the plate thickness and pressure to be any function of the radius, and the boundary conditions can be any. The natural frequencies and waveforms can be determined by including inertia conditions in the matrices. The limitation is that the method covers only axisymmetric deformations and waveforms.

The subject of the paper [8] is a universal software for reinforced concrete ring and circular slabs reinforced in radial and tangential directions. Such slabs are used for roofing and ceiling structures of buildings. The software can be used to design and calculate axisymmetrically loaded circular and circular reinforced concrete slabs with arbitrary supports and spans. Based on the user's choice, the software offers solutions that not only comply with all design principles, including limit state calculations.

Above-ground and suspended tanks are used to store water, liquid oil, petroleum products and similar liquids [9]. The strength analysis of such tanks is about the same regardless of the chemical nature of the product. All tanks are designed as crack-free structures to eliminate any leakage. In this study, an attempt was made to obtain the optimal design of reinforced concrete water tanks at the given characteristics, ensuring the efficiency of geometric forms in terms of functional requirements, assessing the economic efficiency of each of the options. The practical result of the work was the development of tank design program in spreadsheets Microsoft Excel.

Finite element analysis of annular and circular plate is carried out in [10]. Different ratios of inner radius to outer radius are considered to investigate effective geometric characteristics of circular plates. Critical moments and deflections in both annular and circular plates are determined. A finite element analysis of the plates using the ANSYS software was performed to evaluate the results.

The purpose of this work is to analytically and numerically investigate the bending of circular plates on a variable elastic base.

Research materials and methods. The analytical method of direct integration and computer modeling in PC LIRA-SAPR [11-12] with subsequent calculations by the finite element method are used. Two examples are considered: a concrete slab that is rigidly pinch on the inner contour and its outer contour is free and a steel slab that is rigidly pinch on the outer contour and its inner contour is free.

Research results. Consider a circular plate of constant cylindrical stiffness D , lying on a variable elastic base and under the action of a continuously distributed arbitrary transverse load (Fig. 1). Let us denote by a and b the radii of the outer and inner circles of the plate, by r the radial coordinate ($0 \leq r \leq a$), by $q(r)$ the arbitrary transverse load, and by $R(r)$ the elastic base reaction. There will be internal forces in the plate: radial bending moment M_r , circumferential bending moment M_θ and radial transverse force Q_r (Fig. 1).

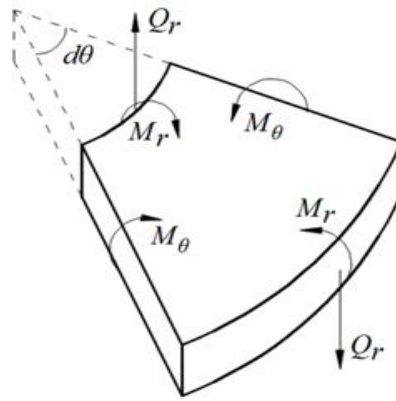


Fig. 1. Forces in the ring plate

Bedding ratio $k(r)$ and load $q(r)$ we will represent in a form [13]:

$$k(r) = k_0 \left(A_0 + A_1 \left(\frac{r}{a} \right) + A_2 \left(\frac{r}{a} \right)^2 + \dots + A_s \left(\frac{r}{a} \right)^s \right); \tag{1}$$

$$q(r) = q_0 \left(B_0 + B_1 \left(\frac{r}{a} \right) + B_2 \left(\frac{r}{a} \right)^2 + \dots + B_p \left(\frac{r}{a} \right)^p \right), \tag{2}$$

where k_0, q_0 – values of bedding factor and load at some characteristic point of the plate.

When a circular plate bends, its deflection function $w(r)$ is defined as [13]:

$$w(r) = \frac{q_0 a^4}{D} W(r); \tag{3}$$

$$W(r) = \lambda_1 X_1(r) + \lambda_2 X_2(r) + \lambda_3 Y_1(r) + \lambda_4 Y_2(r) + X_3(r), \tag{4}$$

where $W(r)$ – dimensionless function, and λ_n – arbitrary dimensionless constants.

$$Y_n(r) = X_n(r) \ln \frac{r}{a} + Z_n(r) \quad (n = 1, 2). \tag{5}$$

For rotation angle and internal forces M_r, M_θ, Q_r we will have [13]:

$$\frac{dw}{dr} = \frac{q_0 a^3}{D} \tilde{W}(r); \quad \frac{d^2 w}{dr^2} = \frac{q_0 a^2}{D} \hat{W}(r); \quad \frac{d^3 w}{dr^3} = \frac{q_0 a}{D} \hat{W}(r); \tag{6}$$

$$M_r = -q_0 a^2 \left(\hat{W}(r) + \mu \frac{a}{r} \tilde{W}(r) \right); \tag{7}$$

$$M_\theta = -q_0 a^2 \left(\mu \hat{W}(r) + \frac{a}{r} \tilde{W}(r) \right); \tag{8}$$

$$Q_r = -q_0 a \left(\hat{W}(r) + \frac{a}{r} \hat{W}(r) - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \tilde{W}(r) \right). \tag{9}$$

It follows from the formulas that the determination of deflections and internal forces in the plate, one way or another, is reduced to the calculation of the values of the functions $X_n(r), (n = 1, 2, 3), Z_n(r), (n = 1, 2)$, as well as their dimensionless derivatives $\tilde{X}_n(r), \hat{X}_n(r), \hat{X}_n(r), (n = 1, 2, 3); Z_n(r), Z_n(r), Z_n(r), (n = 1, 2)$. To represent these functions, series are used, which is described in detail in [14].

Consider examples of calculations, varying the boundary conditions and the law of change in the reaction of an elastic foundation.

Example 1. Consider a concrete slab ($E = 1,5 \cdot 10^7 \text{ kPa}, \mu = 1/6$) of thickness of $h = 0,12 \text{ m}$, outer radius $a = 1,8 \text{ m}$, inner radius $b = 0,9 \text{ m}$, which is under the action of a uniformly distributed constant load $q = 80 \text{ kPa}$. The plate is rigidly pinched on the inner contour and the outer contour is free.

The bedding factor (Fig. 2) is constant: $k(r) = const = 5000kH / m^3$.

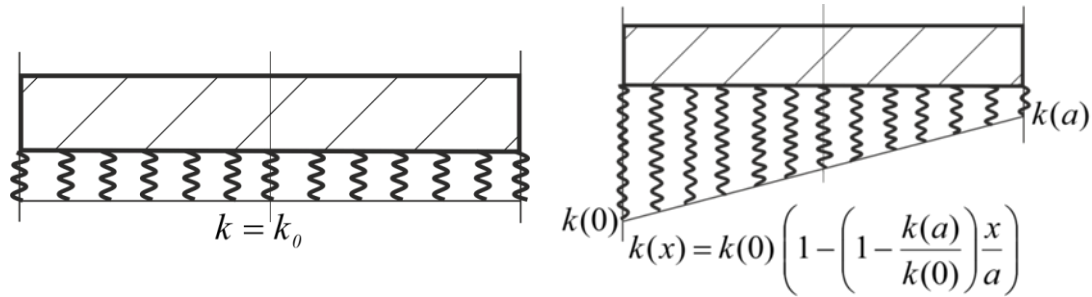


Fig. 2. Laws of change in the bed coefficient

The results of calculations by the author's method (AM) and by the finite element method (FEM) in PC LIRA-SAPR are shown in Table 1, and their graphical interpretation is shown in Fig. 3.

Table 1 – Concrete slab calculation results

| r, M | w, M | | Discrepancy (%) | M_r | | Discrepancy (%) | M_θ | | Discrepancy (%) |
|--------|--------|--------|-----------------|---------|---------|-----------------|------------|---------|-----------------|
| | FEM | AM | | FEM | AM | | FEM | AM | |
| 0,9 | 0,0000 | 0,0000 | 0,000 | -38,953 | -39,086 | 0,341 | -6,4918 | -6,5143 | 0,346 |
| 0,9429 | 0,0209 | 0,0210 | 0,351 | -33,679 | -33,785 | 0,313 | -7,1959 | -7,2321 | 0,500 |
| 0,9857 | 0,0795 | 0,0798 | 0,355 | -29,019 | -29,110 | 0,312 | -7,6406 | -7,6944 | 0,699 |
| 1,0286 | 0,1703 | 0,1709 | 0,352 | -24,902 | -24,980 | 0,312 | -7,8864 | -7,9583 | 0,904 |
| 1,0714 | 0,2886 | 0,2896 | 0,352 | -21,236 | -21,328 | 0,430 | -7,9776 | -8,0689 | 1,132 |
| 1,1143 | 0,4299 | 0,4314 | 0,354 | -17,993 | -18,096 | 0,568 | -7,9512 | -8,0619 | 1,373 |
| 1,1571 | 0,5906 | 0,5928 | 0,373 | -15,130 | -15,241 | 0,731 | -7,8355 | -7,9657 | 1,635 |
| 1,2 | 0,7673 | 0,7703 | 0,384 | -12,602 | -12,720 | 0,925 | -7,6528 | -7,8033 | 1,928 |
| 1,2429 | 0,9573 | 0,9611 | 0,400 | -10,380 | -10,502 | 1,159 | -7,4224 | -7,5930 | 2,247 |
| 1,2857 | 1,1579 | 1,1626 | 0,405 | -8,4350 | -8,5580 | 1,440 | -7,1571 | -7,3496 | 2,619 |
| 1,3286 | 1,3667 | 1,3726 | 0,432 | -6,7404 | -6,8628 | 1,784 | -6,8694 | -7,0853 | 3,047 |
| 1,3714 | 1,5822 | 1,5893 | 0,449 | -5,2763 | -5,3953 | 2,206 | -6,5680 | -6,8098 | 3,550 |
| 1,4143 | 1,8024 | 1,8110 | 0,472 | -4,0236 | -4,1366 | 2,732 | -6,2594 | -6,5311 | 4,160 |
| 1,4571 | 2,0252 | 2,0361 | 0,533 | -2,9660 | -3,0703 | 3,397 | -5,9483 | -6,2558 | 4,915 |
| 1,5 | 2,2512 | 2,2637 | 0,552 | -2,0888 | -2,1817 | 4,260 | -5,6377 | -5,9890 | 5,866 |
| 1,5429 | 2,4772 | 2,4926 | 0,619 | -1,3934 | -1,4578 | 4,417 | -5,3838 | -5,7352 | 6,127 |
| 1,5857 | 2,7026 | 2,7222 | 0,721 | -0,8425 | -0,8872 | 5,038 | -5,1196 | -5,4977 | 6,877 |
| 1,6286 | 2,9255 | 2,9517 | 0,887 | -0,4295 | -0,4592 | 6,469 | -4,8844 | -5,2794 | 7,482 |
| 1,6714 | 3,1476 | 3,1808 | 1,044 | -0,1520 | -0,1647 | 7,701 | -4,6352 | -5,0825 | 8,800 |
| 1,7143 | 3,3689 | 3,4090 | 1,177 | 0,0046 | 0,0050 | 8,605 | -4,5383 | -4,9088 | 7,547 |
| 1,7571 | 3,5882 | 3,6364 | 1,324 | 0,0540 | 0,0575 | 6,154 | -4,3865 | -4,7596 | 7,838 |
| 1,8 | 3,8014 | 3,8627 | 1,587 | 0,0000 | 0,0000 | 0,000 | -4,2246 | -4,6361 | 8,877 |

The analysis of Table 1 shows that the values of deflections practically coincide during the calculation of the ring plate (under the above conditions) by the author's method and by the finite element method in PC LIRA-SAPR, and the discrepancy of the bending moment values reaches 8 %.

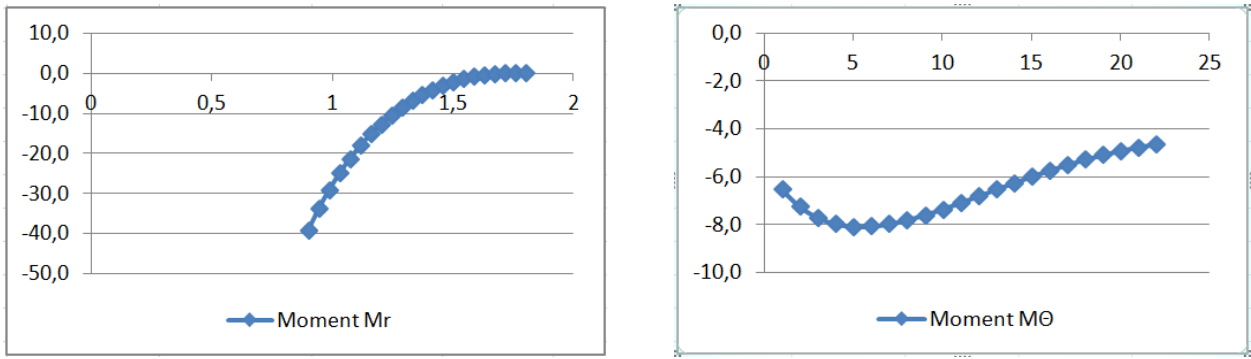


Fig. 3. Radial and circumferential bending moments

Example 2. Consider a steel plate ($E = 2,0 \cdot 10^8 kPa$, $\mu = 0,33$) of thickness of $h = 0,03m$, outer radius $a = 0,9m$, inner radius $b = 0,45m$, which is under the action of a uniformly distributed constant load $q = 30kPa$. The plate is rigidly pinched along the outer contour and the inner contour is free. The bedding coefficient varies according to the linear law: $k(b) = 4000kH / m^3$, $k(a) = 5000kH / m^3$ (Fig. 2). The results of calculations by the author's method (AM) and by the finite element method (FEM) in PC LIRA-SAPR are shown in Table 2, and their graphical interpretation is shown in Fig. 4.

Table 2 – Steel plate calculation results

| r, m | w, m | | Discrepancy (%) | M_r | | Discrepancy (%) | M_θ | | Discrepancy (%) |
|--------|--------|--------|-----------------|---------|---------|-----------------|------------|---------|-----------------|
| | FEM | AM | | FEM | AM | | FEM | AM | |
| 0,45 | 0,0113 | 0,0114 | 0,301 | 0,0000 | 0,0000 | 0,000 | 0,0102 | 0,0104 | 1,583 |
| 0,4714 | 0,0111 | 0,0112 | 0,457 | 0,0036 | 0,0037 | 1,521 | 0,0107 | 0,0110 | 2,233 |
| 0,4929 | 0,0109 | 0,0110 | 0,317 | 0,1125 | 0,0128 | 2,329 | 0,0133 | 0,0138 | 3,361 |
| 0,5143 | 0,0108 | 0,0108 | 0,337 | 0,0247 | 0,0255 | 3,167 | 0,0174 | 0,0182 | 4,486 |
| 0,5357 | 0,0105 | 0,0105 | 0,369 | 0,0388 | 0,0405 | 4,077 | 0,0226 | 0,0239 | 5,614 |
| 0,5571 | 0,0103 | 0,0103 | 0,412 | 0,0535 | 0,0564 | 5,111 | 0,0282 | 0,0302 | 6,773 |
| 0,5786 | 0,0100 | 0,0100 | 0,364 | 0,0672 | 0,0718 | 6,357 | 0,0340 | 0,0369 | 7,974 |
| 0,6 | 0,0096 | 0,0096 | 0,276 | 0,0790 | 0,0858 | 7,940 | 0,0610 | 0,0434 | 8,252 |
| 0,6214 | 0,0091 | 0,0091 | 0,328 | 0,0882 | 0,0970 | 9,110 | 0,0398 | 0,0493 | 8,644 |
| 0,6429 | 0,0086 | 0,0086 | 0,398 | 0,0945 | 0,1043 | 9,379 | 0,0490 | 0,0540 | 9,205 |
| 0,6643 | 0,0080 | 0,0080 | 0,487 | 0,0964 | 0,1067 | 9,673 | 0,0513 | 0,0570 | 10,07 |
| 0,6857 | 0,0073 | 0,0073 | 0,601 | 0,0932 | 0,1032 | 9,642 | 0,0520 | 0,0578 | 10,06 |
| 0,7071 | 0,0066 | 0,0066 | 0,742 | 0,0832 | 0,0927 | 10,19 | 0,0501 | 0,0560 | 10,47 |
| 0,7286 | 0,0057 | 0,0057 | 0,909 | 0,0668 | 0,0744 | 10,23 | 0,0461 | 0,0511 | 9,729 |
| 0,75 | 0,0048 | 0,0048 | 0,544 | 0,0427 | 0,0474 | 9,887 | 0,0391 | 0,0427 | 8,389 |
| 0,7714 | 0,0039 | 0,0039 | 0,369 | 0,0101 | 0,0112 | 9,405 | 0,0276 | 0,0304 | 9,191 |
| 0,7929 | 0,0030 | 0,0030 | 0,303 | -0,0317 | -0,0349 | 9,074 | 0,0126 | 0,0138 | 8,525 |
| 0,8143 | 0,0021 | 0,0021 | 0,272 | -0,0835 | -0,0912 | 8,410 | -0,0066 | -0,0072 | 8,599 |
| 0,8357 | 0,0013 | 0,0013 | 0,201 | -0,1459 | -0,1579 | 7,585 | -0,0300 | -0,0331 | 9,506 |
| 0,8571 | 0,0006 | 0,0006 | 0,000 | -0,2203 | -0,2350 | 6,235 | -0,0586 | -0,0638 | 8,210 |
| 0,8786 | 0,0002 | 0,0002 | 0,000 | -0,3058 | -0,3225 | 5,180 | -0,0926 | -0,0994 | 6,874 |
| 0,9 | 0,0000 | 0,0000 | 0,000 | -0,3959 | -0,4202 | 5,778 | -0,1313 | -0,1400 | 6,224 |

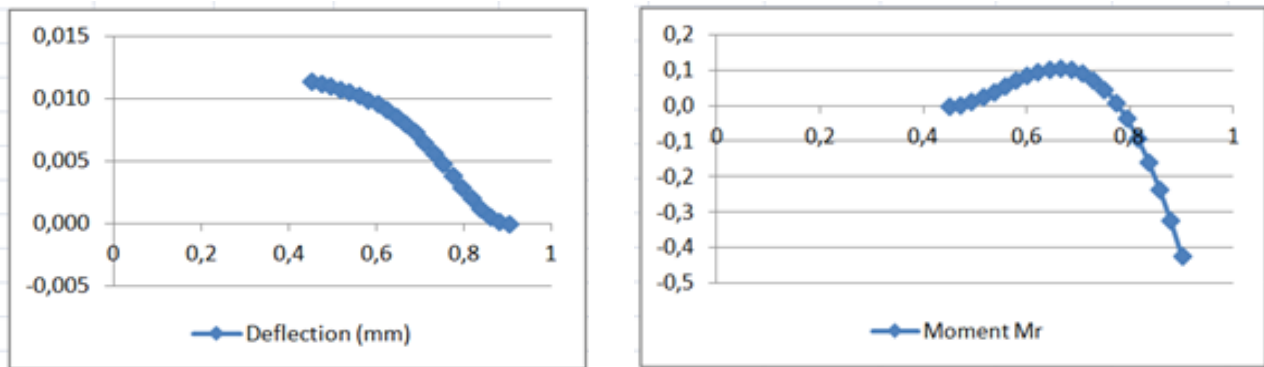


Fig. 4. Deflections and radial bending moments

Here the deflections calculated by the two methods practically do not differ from each other, and the discrepancy between the bending moments is greater than in the previous example (the maximum discrepancy is 10.47%).

Conclusions. The results of calculations by the finite element method in PC LIRA-SAPR, which are given in Tables 1 and 2, were obtained with a semi-automatic breakdown of the finite element grid. This means that a partitioning step of $0,1r$ was chosen along the radius, and the partitioning along the circle of the plate was carried out automatically. With this approach the discrepancy in the results of calculating the deflections of FEM and the author's method was insignificant, while the difference in the results of calculating the radial and circumferential moments turned out to be quite significant. This effect is well known but, as the authors of [15] have shown, when the mesh is thickened in the circumferential direction, the results obtained by the two methods in determining the radial and circumferential bending moments become considerably closer. This becomes particularly important if the design of the slab and its reinforcement is based on modeling and finite element analysis using engineering computer programs.

Thus, the high accuracy of application of the analytical method proposed by the authors – the method of direct integration – for calculations of building structures in the form of circular plates and slabs, which lie on a continuous variable elastic base, is shown.

References

- [1] S.A. Ambartsumian, D. V. Peshtmaldzhian, "K teoryy ortotropnykh obolochek y plastyn", *Yzvestiya AN Arm. SSR seriya fiz.-mat nauk*, vol. 1 (12), pp. 43-59, 1959.
- [2] S.V. Bosakov, "K resheniyu neosesymmetrychnoi kontaktnoi zadachy dlia kruhloi plastynky", *Vestnyk Brestskoho hosudarstvennogo tekhnicheskoho unyversyteta*, vol. 1 (85), pp. 83-87, 2014.
- [3] *Razvitye teoryy kontaktnykh zadach v SSSR*, pod red. L. A. Halyna, M.: Nauka, 1976.
- [4] Abdulhalim Karasin, Polat Gülkan, Gultekin Aktas, "Finite grid solution for circular plates on elastic foundations", *KSCE Journal of Civil Eng.*, vol. 19 (4), pp. 1157-1163, 2014.
- [5] E.R. Telehulova, "Nesushchaia sposobnost plyt, lezhashchykh na deformatsionnom osnovanyy", avtoreferat dySSERTatsyy na soyskanye uchenoi stepeny k.f.-m.n.: 01.02.04, Kazan, 2009.
- [6] V.R. Hrosman, "Nekotorye voprosu statyky kruhlykh ortotropnykh y yzotropnykh plastyn", *Vestnyk MHSU*, vol. 7, pp. 65-68, 2012.
- [7] A.W. Crook, "A transfer matrix method for calculating the elastic behaviour of annular plates", *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 26 (1), pp. 65-73, 1991. doi:10.1243/03093247V261065.
- [8] J. Vaskova, P. Matečková, "Software for Design and Assessment of Rotationally Symmetrically Loaded Reinforced Concrete Slabs in the Shape of Circle or Ring", *In Applied Mechanics and Materials*, vol. 749, pp. 368-372, 2015. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.749.368>.
- [9] Yogesh Rana, Abbas Jamani, "Comparative Study of Annular Raft Foundation & Solid Circular Raft Foundation for Different Diameter of Water Tank", *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 05 (04), pp. 3428-3436, 2018.
- [10] Subhani Shaik, M, Manivannan. «Analysis Of Annular Raft Foundation using Finite

- Element Method», *Proceedings of the First International Conference on Combinatorial and Optimization* 10.4108/eai.7-12-2021.2314553, 2021.
- [11] D.A. Horodetskyi, M.S. Barabash, R.Iu. Vodopianov i dr., *Prohrammnyi kompleks LYRA-SAPR 2015*, Uchebnoe posobyе; pod red. akademyka RAASN A.S. Horodetskoho, M., 2015.
- [12] M.S. Barabash, P.M. Kiriaziev, O.I. Lapenko, M.A. Romashkina, *Osnovy kompiuternoho modeliuвання*, K., NAU, 2019.
- [13] Yu.S. Krutii, "Rozrobka metodu rozviazannia zadach stiikosti i kolyvan deformivnykh system zi zminnymy neperervnymy parametramy" dys. ... d-ra. tekhn. nauk: 01.02.04, Odesa, 2016.
- [14] Y.S. Krutii, M.G. Surianinov, G.S. Karnaukhova, "Calculation Method for Axisymmetric Bending of Circular and Annular Plates on a Changeable Elastic Bed, Part 1. Analytical Relations", *Strength of Materials*, vol. 53(2), pp. 247–257, 2021.
- [15] G.S. Karnaukhova, D.O. Kirichenko, "Krugli pliti na pruzhniy osnovi zi zminnim koefitsientom posteli. Mehanika ta matematichni metodi", vol. 2, pp. 46-61, 2020.

АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ КІЛЬЦЕВИХ ПЛИТ НА ЗМІННІЙ ПРУЖНІЙ ОСНОВІ

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

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

¹Карнаухова Г.С., к.т.н., доцент,
karnauhovaanna@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3542-4300

¹Клименко О.М., аспірант,
bolshajaakula@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9551-9475

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

Анотація. У статті розглядається застосування методу прямого інтегрування до розрахунків кільцевих пластин та плит на безперервній змінній пружній основі. Пластини кільцевої форми зі змінними геометричними та механічними параметрами знаходять все ширше застосування. Змінними параметрами тут можуть виступати не тільки пружна основа, а й товщина пластини, циліндрична жорсткість. Необхідність аналітичного методу розрахунку подібних конструкцій не викликає сумнівів, оскільки дозволяє оцінити точність скінчено-елементного аналізу. На сьогоднішній день у літературі пропозиції щодо загального аналітичного методу розрахунку кільцевих пластин на змінній пружній основі відсутні.

Детальний виклад алгоритму методу прямого інтегрування у роботі не наводиться, проте розрахункові формули для кільцевої пластини взяті з вже опублікованої статті авторів. Розглядаються результати чисельної реалізації цього алгоритму для конкретних прикладів: бетонна плита, яка жорстко затиснена за внутрішнім контуром, а її зовнішній контур – вільний і сталеві плита, яка жорстко затиснена за зовнішнім контуром, а її внутрішній контур – вільний.

Для оцінки результатів розрахунку авторським методом виконано комп'ютерне моделювання розглянутих конструкцій у ПК ЛІРА-САПР та їх розрахунки методом скінчених елементів.

Реакція основи описується моделлю Вінклера зі змінним коефіцієнтом постелі. У першому випадку коефіцієнт постелі прийнято постійним, а у другому випадку він змінюється за лінійним законом. Виконані розрахунки показали, що розбіжність у результатах обчислення прогинів методом скінчених елементів і авторським методом вбирається у 1 %, а результати обчислення радіальних і окружних моментів відрізняються значно, досягаючи 10 %. Цю відмінність автори пояснюють неточністю чисельного аналізу, пов'язаної з напівавтоматичним методом побудови скінчено-елементної сітки, яку слід робити дрібнішою. Згущення сітки в ручному режимі її розбиття суттєво знижує розбіжність між результатами обчислення прогинів, радіальних та окружних моментів, що згинають методом скінчених елементів і авторським методом.

Ключові слова: метод прямого інтегрування, кільцева плита, пружна основа, модель Вінклера, змінний коефіцієнт постелі, метод скінчених елементів, ПК ЛІРА-САПР.

Стаття надійшла до редакції 2.12.2022

INTENSIVE SEPARATE TECHNOLOGY AND ITS INFLUENCE ON THE PROPERTIES OF CEMENT-WATER COMPOSITIONS, SOLUTIONS AND CONCRETES ON THEIR BASIS

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

¹**Babiy I.N.**, Ph.D., Associate Professor,
igor7617@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8650-1751

¹**Streltsov K.O.**, Ph.D., Associate Professor,
0989051837@ukr.net, ORCID: 0000-00021-5463-7395

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
Didrihsona st., 4, Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. The article reviews the issues related to the mechanical activation of Portland cement in the separate technology of the production of concrete mixtures in the production of concrete and reinforced concrete products. Usually, an essential characteristic of composite building materials based on Portland cement and its varieties used in building processes is their rapid setting of strength. Therefore, scientific researches related to the development of technologies aimed at the intensification of cement hydration processes and the growth of the speed of concrete strength gaining are relevant. The work presents the main technological processes during the production of concrete mixtures using intensive separate technology. The usage of this technology, particularly, makes it possible to significantly increase the reversibility of forms due to a more intense concrete strength gaining on mechanically activated Portland cement, especially during the early stages of hardening. The need to include mineral filler in the form of ground quartz sand during the preparation of the cement-water composition in a high-speed mixer is founded. It was experimentally discovered that the rapid mixing of the cement-water composition in the presence of a C-3 superplasticizer causes a sharp decrease in its effective viscosity, which positively affects the reduction of the water content of concrete mixtures of the required ease of workability.

The mechanical activation of Portland cement causes an increase in the amount of chemically bound water in vintage-age cement stone from 13.1% to 17.9%, which means more than 36% compared to the control. It was established that with the same amount of binder, the strength of the concrete on activated Portland cement on the first twenty-four hours of hardening is 1.8...2 times higher compared to the concrete of similar composition, the binder of which was not activated. Over time, the effect of activation on the concrete strength decreases a little, but even at 28 days, the compressive strength of concrete on the activated binder is 25...30% higher compared to the control.

Keywords: concrete, separate technology, tribo-activator, filler, mechanical activation.

Introduction. In the building industry, there is a search for new techniques aimed at speeding up the building process. These methods can be conventionally divided into two types: organizational – the organization of building production, planning, and building management, and technological – the use of new composite materials, machines, units, and equipment.

Among the list of requirements for the technology of manufacturing products on ordinary, standard Portland cement, high importance is paid to the accelerated concrete strength gaining, especially in the early stages of hardening. The use of fast-hardening cement for these purposes is very limited for a number of reasons, including their high cost. Intensification of the concrete hardening process with the help of heat-moisture treatment is currently economically unjustified

due to excessively high tariffs on the heat. Therefore, in our opinion, the search for a new technological method is particularly relevant, which will allow to dramatically accelerate the processes of structure formation of cement-containing composites and obtain concretes with high early strength under normal hardening conditions.

Analysis of recent research and publications. In concrete science, great attention is paid to the study of the properties of the concrete mixture, their optimal composition, as well as rational methods of mixing and compaction to obtain concrete of a given quality [1-3]. Aspects of improving the technology of manufacturing concrete mixtures include: a) modernization of existing types of mixing plants and creation of new types of mixers; b) finding the optimal sequence of loading and mixing the components of the concrete mixture; c) the development of complex recipe-technological methods combining intensive methods of making concrete mixtures with the adding of mineral fillers and chemical additives into their composition, which purposefully regulates the properties of both concrete mixtures and concretes based on them; d) automation of concrete units and so on [4-7].

Turbulent mixers of various constructions are increasingly used in the practice of preparing concrete mixtures. Their use makes it possible to solve issues related to improving the homogeneity of the concrete mixture and increasing the strength of concrete in the vintage age. In this sense, intensive separate technology (IST) for the preparation of concrete mixtures is promising [8-12]. Its use involves the separation of the concrete mixture production process, namely: a) an activated highly concentrated cement-water composition is prepared in a high-speed mixer; b) in a traditional (ordinary) concrete mixer, the dosed for the batch fine and coarse filler is mixed with the cement-water composition to a homogeneous state. The use of high-speed hydrodynamic mixing for cement activation in combination with optimal by its quantity and by the dispersion of mineral fillers, effective additives, and superplasticizers provides, along with plasticization, a sharp acceleration of cement hardening processes, which allows abandoning both the use of quick-setting cement and heat-moisture treatment.

The aim of the research. The described above purposed this work, to determine the influence of mechanical activation of Portland cement on the properties of cement-water compositions, mortars, and concretes based on them.

Research materials and methods. Joint activation of Portland cement and ground quartz sand (specific surface of quartz particles $250 \text{ m}^2/\text{kg}$) was carried out by intensive circulation of the filled cement-water composition with $V/T=0.27$ in a high-speed mixer-tribo-activator. In the tribo-activator, along with the physical and chemical activation of Portland cement particles and ground sand, high homogeneity of the highly concentrated composition is ensured. While mixing, finely dispersed particles of binder and quartz sand are given high speeds and complex trajectories of movement. As a result of their collision with each other in the flow, as well as with the walls and blades of the activator, the degree of wettability increases, even distribution of water, physical and chemical dispersion, peeling off the shielding products of neoplasms from the surface of the binder particles with exposure of new active centers is ensured [9]. All this, in our opinion, will directly affect the acceleration of cement hydration and, as a result, the increase in strength of cement stone and concrete based on it, both in the early stages of hardening and in the vintage age.

Production of concrete mixtures was carried out both by intensive separate (with the use of mechanical activation of the binder in a tribo-activator) and by traditional technologies.

The work used the methods of physical-chemical and physical-mechanical researches (calorimetry, determination of the effective viscosity of cement-water compositions, the amount of chemically bound water, the compressive strength of samples from cement-sand mortar and concrete).

Portland cement PC II/A-III-400 (CEM II/A-S 400) with an activity of 41.0 MS, manufactured by "Yuhtcement" [a branch of JSC "Dyckerhoff Cement Ukraine"], which meets the requirements of DSTU (National Standard of Ukraine) Б B.2.7-46:2010, "Cement for general

construction purpose. Technical conditions" was used as a binder in the research. Ground quartz sand with a specific surface area of $250 \text{ m}^2/\text{kg}$ was used as mineral filler. For the plasticization of cement-water compositions, as well as mortar and concrete mixtures based on them, a condensation product of naphthalene sulfonic acid and formaldehyde was used – superplasticizer C-3. The consumption of the superplasticizer was assumed to be equal to 1% of the mass of the binder. As aggregates for concrete, quartz sand from the Oleksandrivskiy quarry in the Odesa region with a coarseness modulus of $M_k=2.2$ and granite crushed stone of fractions 5-10 and 10-20 mm were used in a ratio of 1:1 by the weight.

The evaluation of the structural characteristics of the cement-water composition – the effective viscosity η – was determined using a rotary viscometer "Polymer-RPE-1M".

Research results. Shown in the Fig. 1 graphical dependence of the effective viscosity of the modified cement-water composition on the duration of mechanical activation τ shows that high-speed mixing causes a sharp decrease in η (up to 30 times), reaching its minimum value after 150 seconds activation.

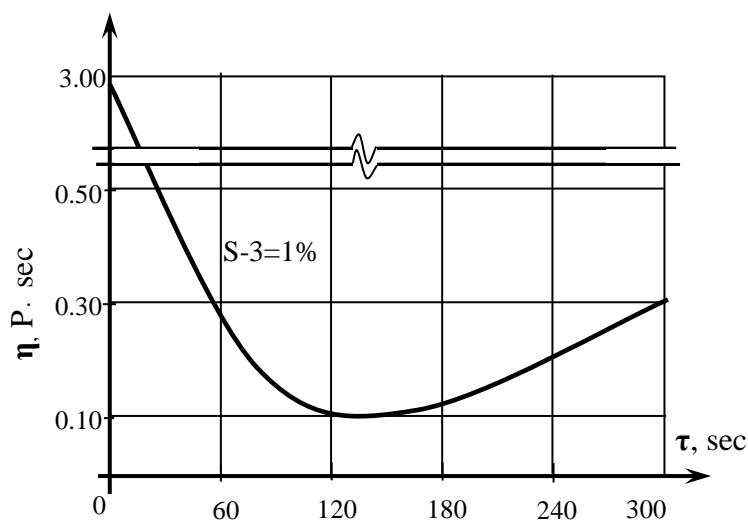


Fig. 1. The influence of the term of high-speed mixing of the cement-water composition on the change in effective viscosity η

the mixing water. It was found that the initial decrease in the effective viscosity of the cement-water composition is accompanied by a decrease in the amount of free water in it. At the moment when the effective viscosity of the cement-water composition reaches its minimum value, water division almost completely stops Fig. 2, b. In the following period, a more intensive increase in the mixture temperature is observed, which indicates an increase in frictional forces between cement particles in the process of high-speed mixing of the cement-water composition, Fig. 2, a. Thus, free water, being adsorbed on the newly created surfaces of the binder particles, gradually transits into a bound state and ceases to play the role of "lubricant", which leads to an increase in frictional forces, which is recorded by a more intensive increase in the temperature of the mixture (Δt_z) in comparison with heating (Δt_i) of the cement-water composition in the initial period of rapid mixing.

A sufficiently objective characteristic of the kinetics of the physico-chemical process of hydration of the binder is the exothermic heating of the hardening cement-water composition. The hydration temperature was determined using a thermal calorimeter. The choice of this method is due to the fact that it allows estimating of the hydration and structure formation processes over time, as well as quantifies the temperature change of the hardening composition.

Further high-speed mixing is accompanied by the thickening of the cement-water composition, which is fixed by the increase in the value of the effective viscosity. To identify the reason for such a change in the effective viscosity in the process of high-speed mixing of the cement-water composition, experiments were conducted in which three input parameters were simultaneously controlled:

- effective viscosity;
- temperature of the cement-water composition;
- water division.

For the purity of the experiment, it was assumed that there was no S-3 superplasticizer in

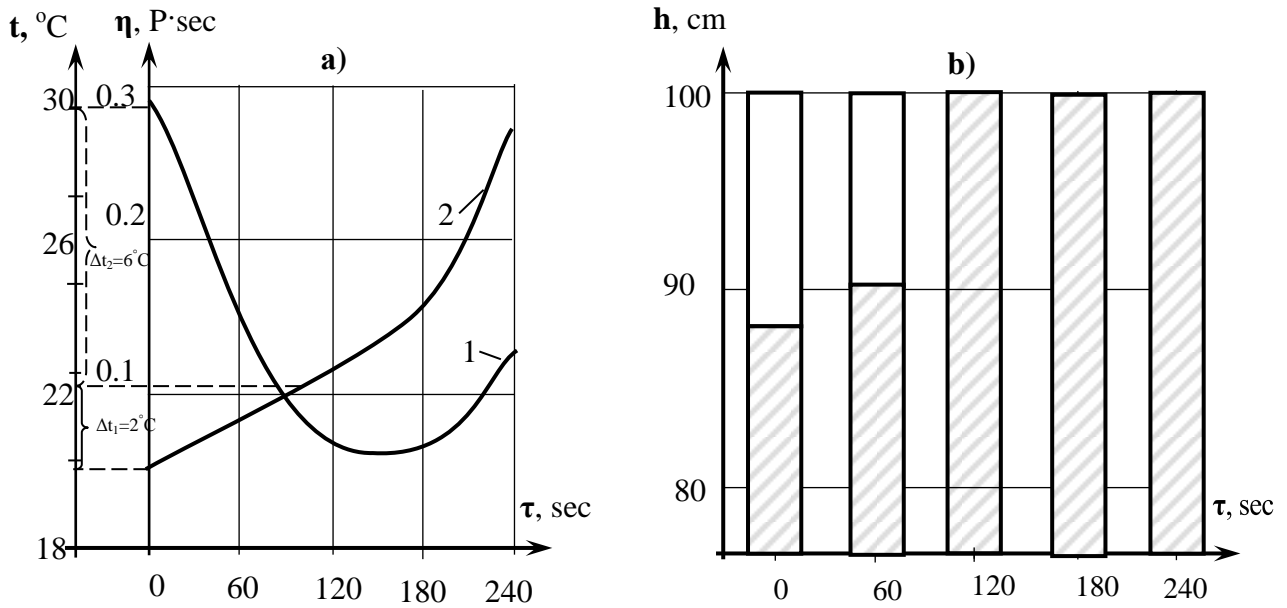


Fig. 2. The influence of the activation term τ on the effective viscosity, temperature (a) and water division (b) cement-water compositions:
 1 – effective viscosity; 2 – the temperature of the cement-water composition
 □ – free water in the cement-water composition
 ▨ – cement-water composition

After 120 seconds of activation, the cement-water composition was placed in a container with a volume of 200 cm³, which, in its turn, was installed into the calorimeter. The temperature of the hardening cement-water composition was measured using electronic sensors. For control, a cement-water composition was prepared, which was not subject to mechanical activation. As it can be seen from Fig. 3, the mechanical activation leads to an increase in both the rate of heating of the cement-water composition and an increase in the maximum heating temperature.

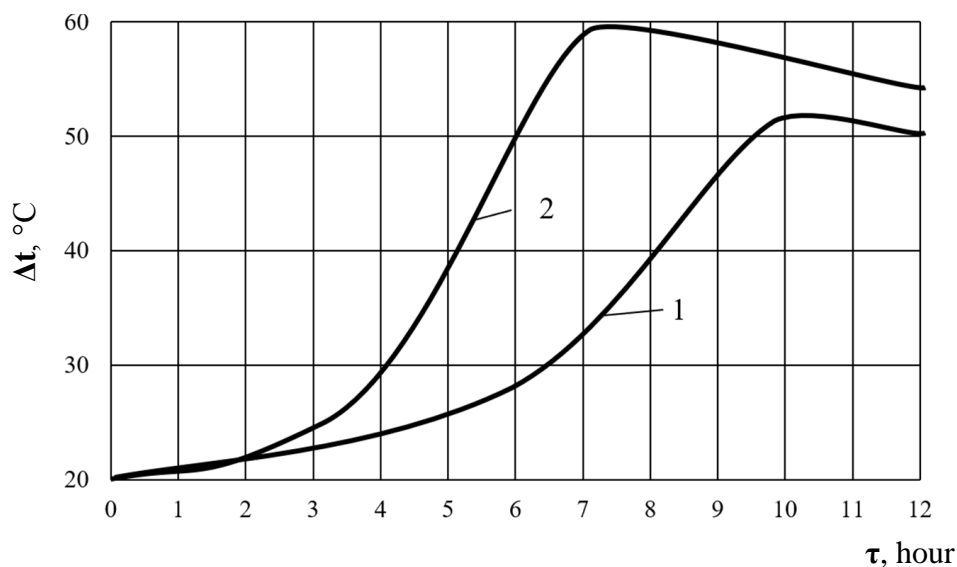


Fig. 3. Kinetics of exothermic heating of hardening cement-water compositions:
 1 – control; 2 – mechanically activated Portland cement

Data on the content of chemically bound water in cement stone at the age of 1 day to 28 days of normal hardening at a temperature of +20°C confirm the increase in the rate of hydration of Portland cement due to its mechanical activation, Table. 1.

Table 1 – Amount of chemically bound water in the cement stone

| Technology production | The content of chemically bound water, %, aged, day | | | |
|--|---|------|------|------|
| | 1 | 3 | 7 | 28 |
| Traditional manufacturing of cement-water composition | 6.2 | 10.3 | 12.9 | 13.1 |
| Mechanic-chemical activation of cement-water composition | 10.2 | 14.1 | 17.2 | 17.9 |

Of particular interest was the effect of mechanical activation of cement on the growth kinetics of chemically bound water in cement stone during the first 24 hours of hardening, Fig. 4.

Attention should be paid to the fact that three hours after mixing, the amount of chemically bound water in the hardening cement-water composition on mechanically activated Portland cement and on cement that was not mechanically activated is practically the same and is in the range of 2.8% to 3.4%. However, already after 6 hours of hardening, there is a sharp increase in the amount of chemically bound water for mechanically activated cement – from 3.4% to 5.9%. For a traditionally prepared cement-water composition, there is a gradual increase in the amount of chemically bound water – from 2.8 to 3.4%. After 24 hours of hardening, the amount of chemically bound water in the activated cement-water composition is approximately 1.6 times bigger compared to the composition, the binder of which was not subject to mechanical activation. In the subsequent periods of hardening, the difference between the amounts of chemically bound water in the activated and non-activated Portland cement decreases, and at the vintage age does not exceed 27...37%.

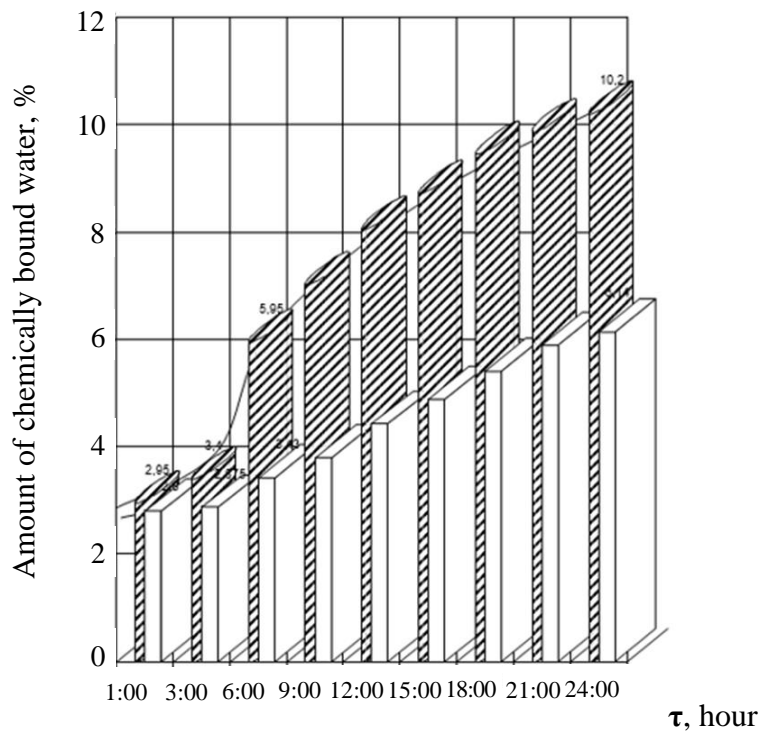


Fig. 4. The influence of mechanical activation on the kinetics of chemical binding of water in the hardening cement stone:

- – control;
- ▨ – mechanically activated Portland cement

The effect of mechanic-chemical activation of cement on strength was studied on cement-sand samples made from a mixture of composition – C:P = 1:3 with a water-cement ratio W/C = 0.4, Fig. 5.

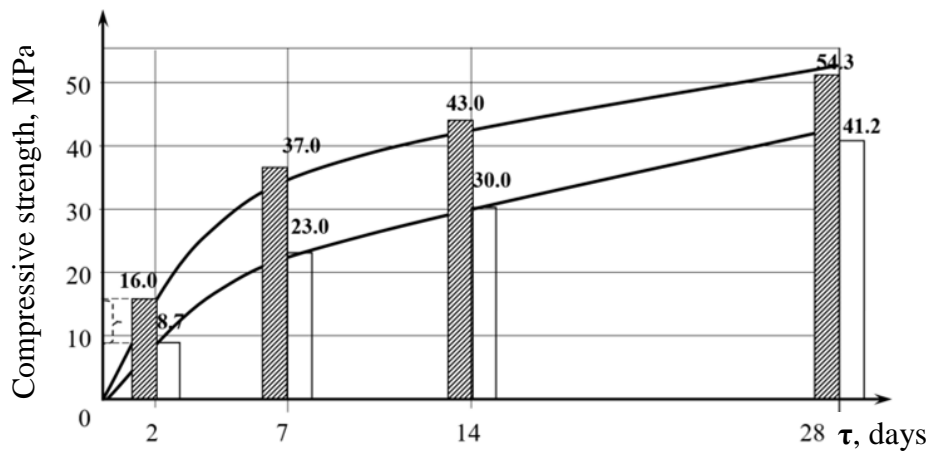


Fig. 5. The influence of mechanical activation on the strength of cement-sand mortar:
 □ – control; ▨ – mechanically activated Portland cement

The activated cement-water composition was mixed in a dosed amount of sand, and after compaction on a vibrating platform, the beam samples were hardened in 4×4×16 cm forms at a temperature of +20°C. The kinetics of strength gaining of the cement-sand solution shows that the activation of cement leads to a more intense increase in the strength of the samples compared to the samples made on Portland cement, which was not subjected to mechanical activation.

This is especially noticeable in the initial stages of hardening. At the age of 2 days, samples on mechanically activated cement are characterized by 1.84 times higher compressive strength compared to samples made on a binder that was not subject to mechanical activation. At a later age, the strength of the samples evens out somewhat, and on the 28th day of hardening, the compressive strength of the samples on mechanically activated cement exceeds the strength of the control samples by no more than 30...32%.

Mechanical activation of Portland cement also significantly affects the strength of concrete. This is confirmed by the results of the compressive strength of concrete at the age of 28 days on the mechanically activated binder, as well as on the binder that was not mechanically activated (control), Fig. 6. In the experiment, the composition of concrete (cement: sand: aggregate = 1:2:4) was studied with the consumption of a mixed binder (Portland cement + ground sand) in the amount of 450 kg/m³.

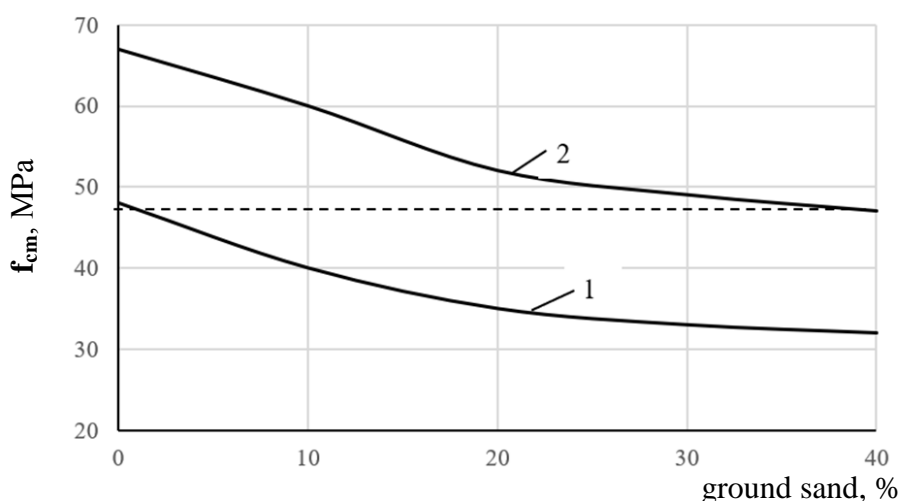


Fig. 6. The influence of the concentration of ground sand in Portland cement on the f_{cm} of concrete in the 28th day age:
 1 – concretes, made according to traditional technology; 2 – intensive separate technology of concrete production

The mobility of the concrete mixture was assumed to be constant (concrete mix slump = 3 cm) and was corrected (depending on the consumption of ground sand in the binder) by the consumption of mixing water. The amount of C-3 superplasticizer was taken at the level of 1.0% (in terms of dry matter) of the binder consumption.

As the research results show, the replacement of a portion of Portland cement with ground quartz sand leads to a decrease in the strength of concrete made by traditional technology, Fig. 6 (curve 2), which coincides with the experimental data given in the work [13]. At the same time, the intensive separation technology for the production of concrete mixtures contributes to the gaining the concretes with a compressive strength 35...45% higher in comparison with concretes of similar composition, which are produced according to traditional technology, Fig. 6 (curve 2), due to physical and chemical processes considered in the work [10]. Thus, the second important advantage of IST over traditional technology is the resource-saving effect, which allows replacing up to 40% of Portland cement with ground sand, obtaining practically the same compressive strength characteristics of concrete as for concrete made by the traditional method, but without introducing Portland cement ground sand in the given range.

Conclusions:

1. The positive effect of high-speed mixing of cement-water compositions in the presence of C-3 superplasticizer on the reduction of their effective viscosity η was revealed. The combined effect of mechanical activation and C-3 additive provides a decrease in η up to 30 times compared to the effective viscosity of a non-mechanically activated cement-water composition of a similar composition.
2. Due to the mechanical activation of cement-water compositions, the amount of chemically bound water in cement stone of vintage age increases from 13.1% to 17.9%, that is, by more than 36% (compared to the control).
3. An important advantage of IST over the traditional technology is the resource-saving effect, which allows replacing up to 40% of Portland cement with ground quartz sand ($S=250\text{m}^2/\text{kg}$), while obtaining the same compressive strength of concrete at the vintage age, which is achieved by concrete on non-mechanically activated cement, but without the addition of ground sand (control).

References

- [1] F. De Larrard, *Concrete mixture proportioning. A scientific approach*. London and New York, 1998.
- [2] A.K.H. Kwan, L.G. Li, "Combined effect of water film thickness and paste film thickness on rheology of mortar", *Materials and Structures*, vol. 45, no. 1, pp. 1359-1374, 2012.
- [3] A. Baule, F. Morone, H.J. Herrmann, H.A. Makse, "Edwards statistical mechanics for jammed granular matter", *Reviews of modern physics*, vol. 90, no. 1, pp. 015006-015064, 2018.
- [4] M.A. Sanic'kij, H.S. Sobol', T.C. Markiv, *Modifikovani kompozicioni cementi*. L'viv: Vidvo L'vivskoi politehniky, 2010.
- [5] G. Roquier, "The 4-parameter Compressible Packing Model (CPM) including a new theory about wall effect and loosening effect for spheres", *Powder Technology*, vol. 302, no. 1, pp. 247-253, 2016.
- [6] A.V. Usharov-Marshak, "*Dobavki v beton: progress i problemy*", *Stroitel'nye materialy*, no.1, pp. 8-12, 2006.
- [7] R.F. Runova, V.I. Goc, M.A. Sanic'kij ta in., *Konstrukciji materialy novogo pokolinnya ta tekhnologii ih vprovadzheniya v budivnictvo*. K: UVPK «EksOb», 2008.
- [8] T. Kropyvnitska, M. Sanytsky, T. Rucinska, O. Rykhlytska, "Development of nanomodified rapid hardening clicker – efficient concretes based on Portland-composite cement", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technology organic and inorganic substances*, vol. 4/6(100), pp. 38-48, 2019.
- [9] I.V. Barabash, *Mekhanohimichna aktivaciya mineral'nih v'yazhuchih rehovin*. Odesa, AstroprInt, 2002.

- [10] V.N. Vyrovoy, I.V. Barabash, A.V. Dorofeev, I.N. Babij, T.I. Barabash, V.D. Matkovskij, S.E. Gurevich, *Mekhanoaktivaciya v tekhnologii betonov*. Odessa: OGASA, 2014.
- [11] I. Barabash, D. Harashenko, "Mechanoactivation of the Portland cement in technology of manufacturing self-compacting concrete", *Eastern-European journal of enterprise technologies*, no. 3/6 (93), pp. 12-17, 2018.
- [12] A.I. Adyilhodzhaev, V.I. Solomatov, *Osnovyi intensivnoy razdelnoy tehnologii betona*. Tashkent: Fan, 1983.
- [13] A.V. Smolyarov, "Vliyaniye tsementa s mineralnymi dobavkami iz molotogo prirodnogo peska i granitnogo otseva na svoystva tyazhelogo betona", *Sb. nauch. tr.* Minsk: NIIS, 2019, Vyp. II, pp. 271-287.

ІНТЕНСИВНА РОЗДІЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ І ЇЇ ВПЛИВ НА ВЛАСТИВОСТІ ЦЕМЕНТНО-ВОДНИХ КОМПОЗИЦІЙ, РОЗЧИНІВ ТА БЕТОНІВ НА ЇХ ОСНОВІ

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

¹**Бабій І.М.**, к.т.н., доцент,
igor7617@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8650-1751

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

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

Анотація. У статті розглянуті питання щодо механоактивації портландцементу у роздільній технології виготовлення бетонних сумішей при виробництві бетонних та залізобетонних виробів. Зазвичай, важливою характеристикою композиційних будівельних матеріалів на основі портландцементу та його різновидів, що використовуються в будівництві, є їх швидкий набір міцності. Тому актуальними є наукові дослідження, які пов'язані з розробкою технологій, спрямованих на інтенсифікацію процесів гідратації цементу та зростання швидкості набору міцності бетону. В роботі наведені основні технологічні процеси при виробництві бетонних сумішей за інтенсивною роздільною технологією. Застосування даної технології, зокрема, дозволяє суттєво підвищити оборотність форм за рахунок більш інтенсивного набору міцності бетоном на механоактивованому портландцементі, особливо у ранні терміни твердіння. Обґрунтована необхідність введення під час приготування цементно-водної композиції в швидкісному змішувачі мінерального наповнювача у вигляді молотого кварцового піску. Експериментально встановлено, що швидкісне змішування цементно-водної композиції в присутності суперпластифікатора С-3 викликає різке зниження її ефективної в'язкості, що позитивно позначається на зниженні водовмісту бетонних сумішей необхідної легкоукладальності. Механоактивація портландцементу викликає зростання кількості хімічно зв'язаної води в цементному камені марочного віку з 13,1% до 17,9%, тобто більше ніж на 36% в порівнянні з контролем. Встановлено, що при однаковій витраті в'язучого, міцність бетону на активованому портландцементу на першу добу тверднення в 1,8...2 рази вища у порівнянні з бетоном аналогічного складу, в'язуче якого активації не піддавалося. З плином часу вплив активації на міцність бетону дещо знижується, але і у 28-и добовому віці міцність бетону на стиск на активованому в'язучому в середньому на 25...30% вища у порівнянні з контролем.

Ключові слова: бетон, роздільна технологія, трибоактиватор, наповнювач, механоактивація.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2022

**ANALYSIS OF PROPERTIES OF DECORATIVE CONCRETE
IN ISOPARAMETRIC CONDITIONS OF OPTIMALITY CRITERIA**

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

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

¹**Khlytsov N.V.**, PhD, Associate Professor,
khlytsov@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0003-3486-6833
¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
4, Didrikhson str., Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. The article presents two computer materials science methods for analyzing the functional properties of decorative concrete. *The method of experimental-statistical modeling* is used to build nonlinear structured models that describe the material's physical, mechanical, and technological properties in the coordinates of five factors of concrete composition. The study of the influence of recipe factors on the characteristics of the composite was carried out according to a symmetrical three-level 27-point plan. Depending on the nature of the effect on the decorative composite, varied raw materials are combined into two groups of factors – modifications of the cement-sand system and parameters of dispersed reinforcement. A comparative analysis of the local properties fields of reinforced and non-reinforced material compositions showed the feasibility of reinforcing the cement-sand matrix with hybrid glass fibers. However, based on the purpose of the work – to control the characteristics of a decorative non-reinforced composite, subject to a constant level of one of its criteria, *the method of isoparametric analysis* was used. The change in the quality criteria of composite compositions was analyzed in two versions of isoparameters. In the first one, all mortar mixes were characterized by the same viability within time $\tau = 1.0 \pm \Delta\tau$, in the second one, all concrete compositions were isosthenic within the limits of compressive strength $f_{cm} = 56 \pm \Delta f_{cm}$. For statistical testing of the characteristics of the material, together with experimental statistical models, the Monte Carlo method was used. According to the results of the isoparametric analysis of the functional properties of the decorative composite, it was fairly reliably determined by the area of compromise relationships between the zeolite and the fine-grained filler, however, the coordinates of their optimal amount don't match according to all criteria. An analysis of the results obtained by this method demonstrates that an engineering compromise between these factors should be sought in the area of their main levels of variation. Introducing finely dispersed zeolite instead of a part of cement is a technologically useful technique for improving the quality and durability of unreinforced decorative concrete.

Keywords: decorative concrete, zeolite, fibre, experimental-statistical model, strength, computational experiment, constant level of property, isoparametric analysis.

Introduction. The use of decorative concrete with a complex of given characteristics is growing in many countries. The widespread use of these concretes due to their improved quality and reliability in architectural products (structures). The priority is the invariance of artistic and aesthetic expressiveness for the entire period of operation. In the context of their functionality, decorative composites should be characterized by high rates of ease of installation, early strength, crack resistance, discoloration, etc. [1]. Therefore, during the study of the characteristics of concrete, there is an urgent need to analyze its quality indicators in combination with one or more properties that are strictly regulated by the manufacturing technology of products, especially products of complex shape (for example, architectural elements, etc.).

To solve this type of technological problems, professor V.A. Voznesensky [2] proposed the principle and methodology for isoparametric analysis (IP-analysis) to control the characteristics of building composites. IP-analysis, according to [3], is carried out based on the results of a

computational experiment, for the implementation of which mathematical models are used, obtained from the data of experimental-statistical modeling of material quality criteria.

Analysis of literature data and problem statement. The analysis of domestic and foreign literary sources showed a relatively wide range of technical and economic problems. It is necessary to compare the quality indicators of building composites with the given values of their technological, physical, and mechanical properties [4-12]. At the same time, positive experience in the implementation of research tasks according to the method of V.A. Voznesensky and T.V. Lyashenko [2, 3] accumulated in the field of such composite materials: during the optimization of the structural parameters of cellular concrete according to the criteria for minimizing thermal conductivity and average density, which made it possible to identify gas silicate compositions that have a lower density at a given compressive strength [8]; during the optimization of particle size distribution and mineralogical composition of fillers for polyester resins. The resulting polymer composition is characterized by a low resin content and specified indicators of rheological and mechanical properties [3, 9]; to assess the influence of operational factors on the probable physical and mechanical parameters of fine-grained concrete. The analysis of the constructed distribution curves according to probable criteria confirmed that such characteristics as tensile strength during bending and water absorption are more sensitive to destructive processes that occur in the structure of the composite under the cyclic influence of environmental factors [10]; in the study of changes in the functional properties of modified epoxy composites. The obtained results of IP-analysis contributed to the identification of compositions that simultaneously have minimum absorption and maximum resistance to the influence of water and oil following the regulatory requirements for the criteria set for the composite [11]; while determining the rational compositions of fiber concrete used for the manufacture of architectural elements. The application of the method made it possible to determine the area of compromise ratios between glass and polypropylene fibers [12], etc., under isosthenic conditions of the properties of the composite.

The presented results in scientific papers [8-12] demonstrate – that the IP-analysis method allows to obtain several meaningful solutions that are useful for the production and use of construction materials made on various binders. In this case, IP-analysis can be used to solve the problem of obtaining decorative concrete with certain characteristics but with a slightly smaller margin of the compressive strength coefficient [1]. This is due to the fact that the architectural elements of the facades of buildings and structures during operation do not carry power loads. Therefore, taking into account the practical orientation of the use of the composite, in particular the requirements for its characteristics, it is of interest to analyse the quality criteria of the material compositions without fibrous filler. At the same time, it is important that the stage of obtaining a composition is combined with the shaping of an architectural product. Along with the requirements for the mechanical properties of concrete, requirements are put forward for the properties of the mortar mix. In this regard, the optimization of technological and mechanical quality criteria of decorative composites is an urgent problem, the solution of which requires the use of isoparametric analysis.

The purpose and objectives of the research. The purpose of the work is to determine the area of compromise ratios between the zeolite filler and the fine-grained aggregate while providing the specified levels to the characteristics of the viability of the mixture and the strength of decorative concrete.

The main task of the research is the analysis of the features of the effect of zeolite and sand granulometry on the functional properties of decorative non-reinforced composites in isorheological and isosthenic conditions.

Field experiment and modeling. The experiment to determine the properties of decorative concrete was conducted according to the 27-point, 5-factor plan [1, 13]. Two groups of composition factors were varied: "*Modifiers of the cement-sand matrix*" and "*Parameters of dispersed reinforcement*".

The first group included dosages of finely dispersed zeolite at levels of $X_1 (Z) = 4 \pm 4$ parts by mass or p.m. (introduced instead of a part of cement), fractions of fine-grained sand mixed with coarse-grained sand $X_2 (SG) = 50 \pm 20$ p.m. and superplasticizing additive based on polycarboxylate $X_3 (MF) = 0.5 \pm 0.2$ p.m. from the mass of the binder. In the second – highly dispersed glass fibers with a length of 6 and 12 mm, which were introduced in the amount of $X_4 (F6) = X_5 (F12) =$

0.015±0.015 p.m. from the mass of the soluble mixture. The compositions were made with different water-cement ratio, which ensured the fulfillment of the requirement for the same mobility of the mixture – grade S4. Production and testing of samples were carried out following DSTU B V.2.7-239:2009. The composite has requirements for the shelf life of the mixtures $\tau \geq 0.95$ hours and beyond the limit of compressive strength $f_{cm} \geq 50$ MPa.

According to the experimental data [1, 13], a complex of nonlinear structured experimental-statistical models (ES-models) was built, which describe the fields of physical, mechanical, and technological properties in the coordinates of five composition factors. Thus, model (1) with 13 non-zero coefficients describes the complete field of time τ attainment of the plastic strength P_m of 35 kPa (corresponds to the initial consistency of the S4 mixture) in case of an experimental error $s_e(\tau\{P_m=35\}) = 0.127$ hour.

$$\tau\{P_m=35\} = 1.136 \begin{matrix} \begin{matrix} -0.141x_1 \pm 0 & x_1^2 + 0.069x_1x_2 \\ -0.102x_2 - 0.198x_2^2 & -0.053x_1x_3 \\ -0.480x_3 + 0.382x_3^2 & -0.068x_2x_3 \end{matrix} & \begin{matrix} -0.052x_1x_4 \pm 0 & x_1x_5 \\ \pm 0 & x_2x_4 \pm 0 & x_2x_5 \\ +0.061x_3x_4 \pm 0 & x_3x_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \pm 0 & x_4 + 0.157x_4^2 & -0.084x_4x_5 \\ \pm 0 & x_5 \pm 0 & x_5^2 \end{matrix} \end{matrix} \quad (1)$$

The basic generalizing indicators [2] of this field are: $\tau\{P_m=35\}_{max} = 2.35$ (at $x_1 = x_3 = x_4 = -1$, $x_2 = -0.26$, $x_5 = +1$), $\tau\{P_m=35\}_{min} = 0.515$ hours (at $x_1 = x_2 = +1$, $x_3 = +0.77$, $x_4 = +0.29$, $x_5 = +0.99$) and relative growth $\delta(\tau\{P_m=35\})$ – in 4.6 times. In Fig. 1 shows the local field $\tau\{P_m=35\}$ in coordinates of zeolite (Z) and fine sand (SG) factors at maximum plasticization of composite compositions ($MF = 0.7$ p.m.) and the content of hybrid fibers at low and medium levels ($F6 + F12 \rightarrow 0$ and 0.03 p.m.). So the diagram $\tau\{P_m=35\}$ shows two surfaces formed by reinforced and non-reinforced composite compositions (upper and lower planes). Suitable local fields for compressive strength f_{cm} (MPa) and flexural tension f_{ctfm} (MPa), water absorption W_m (% by weight after 24 hours of exposure), medium density $\rho_{c.d}$ (kg/m³), and the coefficient of technological influence K_T (was determined by crack resistance [14]) are also presented in Fig. 1. The expediency of introducing hybrid fibers into the composition of composites, the presence of which makes it possible to significantly strengthen the cement-sand matrix under such conditions, is confirmed. ($f_{cm,max} = 72$ MPa). However, as noted in the review of this work, local fields of unreinforced concrete compositions are useful for the analysis of quality criteria.

The results of the research. Methodological bases of IP-analysis. For a computer study of the Y characteristics of decorative concrete, together with the ES models, the Monte Carlo method was used, which makes it possible to evenly distribute the levels of prescription factors within the given limits. The change in the properties of the composite was analyzed in two versions of isoparametric conditions (IP conditions). In the first version, all soluble compositions were characterized by the same viability within $\tau\{P_m=35\} = 1.0 \pm \Delta\tau$, in the second, all concrete compositions were isosthenic within $f_{cm} = 56 \pm \Delta f_{cm}$. It should be noted that for the IP analysis on two factorial fields of these criteria (Fig. 1 – lower surface), the isolines corresponding to their median values were selected.

The width of the corridor for the isoparameters was given by the mean square error of the field-in experiment $s_e\{Y\}$, the average value of the prediction variance function d in the local field, and the t_{α} -distribution quantile for the tolerable risk α . However, the calculation of the value of the d -function is somewhat simplified compared to that recommended in [2] and is performed in two stages. In the 1st stage, the dispersion for the average value at each point of the experiment plan is determined; in the 2nd stage, the primary quadratic model of the dispersion of the isoparameter $d\{Y\}$ is built in the COMPEX program, which is used to calculate the model for the local field in the x_1 and x_2 coordinates while stabilizing the other factors at levels $x_3 = +1$, $x_4 = x_5 = -1$. Thus, half the width of the corridor $\Delta Y = t_{\alpha} \cdot s_e \cdot d^{0.5}$ amounts to $\Delta\tau = 0.05$ hour, and for $\Delta f_{cm} = 3.15$ MPa. After that, in two factorial areas,

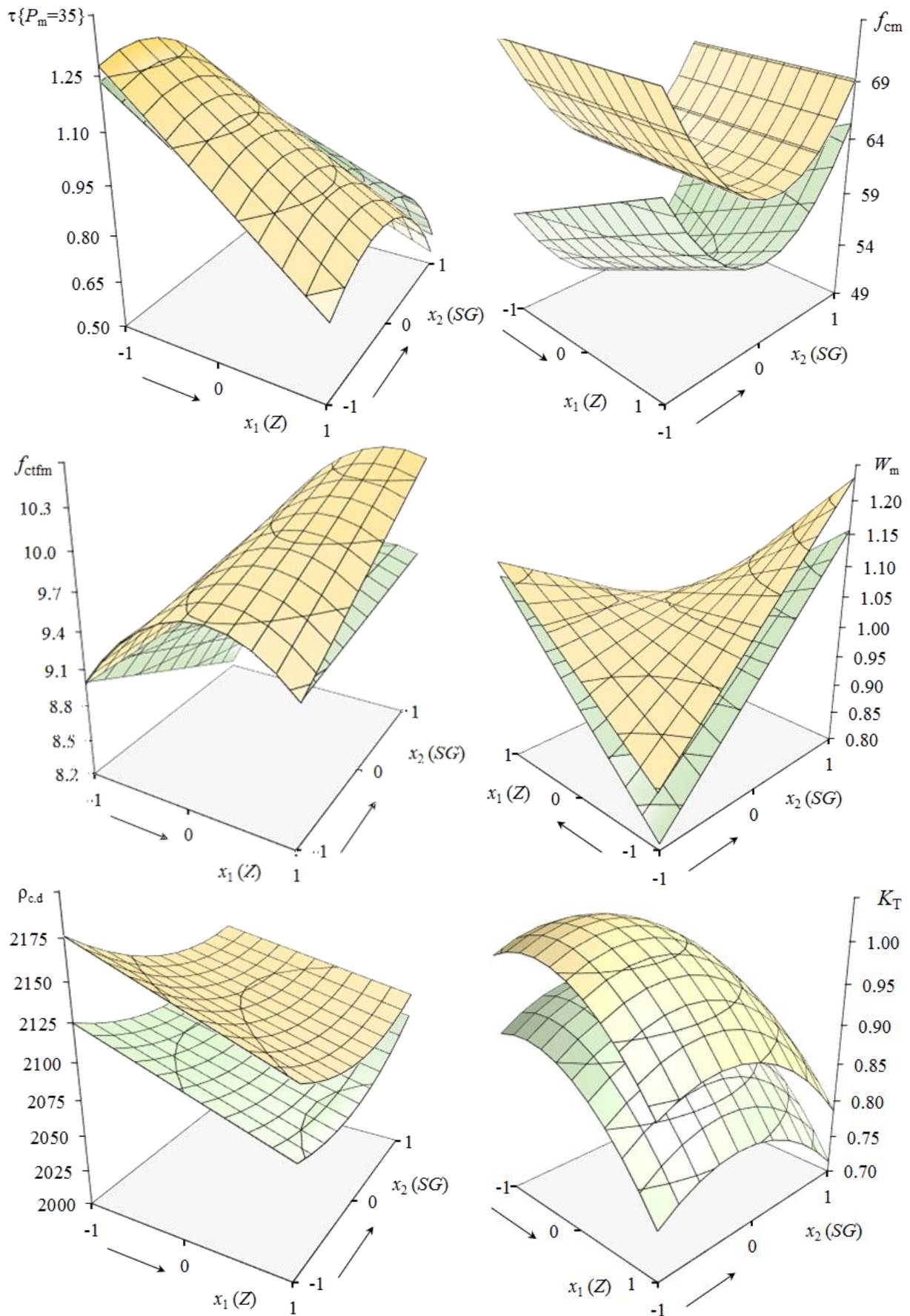


Fig. 1. Local authorities of hybrid-reinforced and non-reinforced warehouses (upper and lower upper) decorative composites with a high level of plasticization

the Monte Carlo method generates 1000 evenly distributed compositions (points) in the coordinates of the x_1 and x_2 factors, to which four mandatory ones are added at the square's vertices. Further, for each field composition, according to the EU models, the values are quantified $\tau\{P_m=35\}$ and f_{cm} . Out of 1004 generated points, only compositions of composites are selected for participation in the analysis, the isoparameter values of which fall within the confidence corridor for $0.95 \leq \tau\{P_m=35\} \leq 1.05$ hour, $52.85 \leq f_{cm} \leq 59.15$ MPa (Fig. 2a and b). It is important that the lower boundaries of the isoparametric corridor of properties correspond to the normalized levels regulated by the technology when

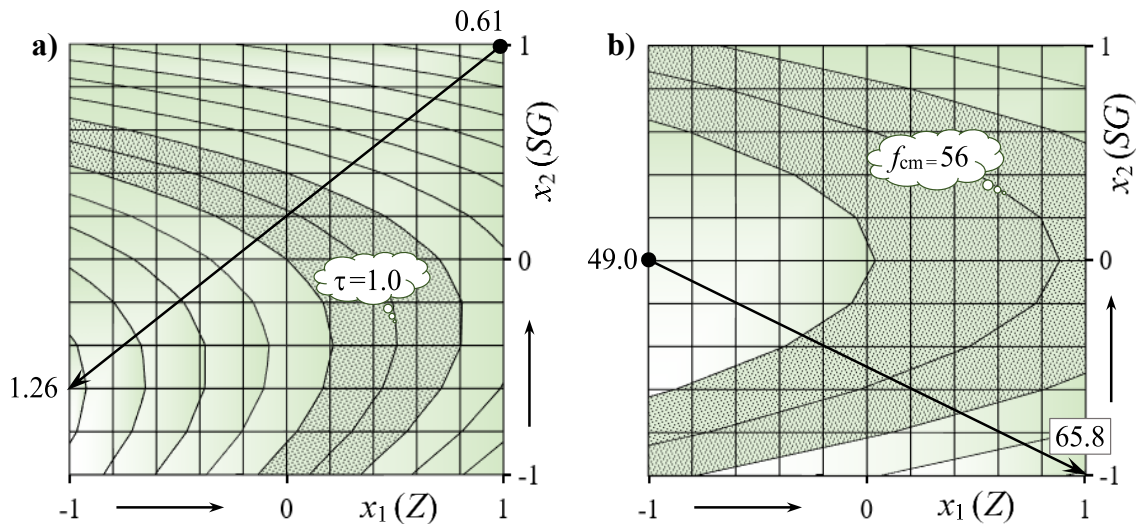


Fig. 2. The impact of zeolite x_1 and fine sand x_2 on pot life is high plasticized mixtures (a) and compressive strength of non-reinforced composite (b)

developing a decorative material. Such composites in IP-corridor for $\tau\{P_m=35\}$ and f_{cm} left 273 and 583, respectively, which covers about 27 % and 58 % of their local fields. At the same time, the continued viability of mixtures in the corridor is ensured by changing the levels of factors within limits for zeolite x_1 from -0.95 to +0.83 and fine sand x_2 from -0.99 to +0.60 and a compromise solution for concrete under isosthenic conditions is only achieved within the initially specified limits x_1 and x_2 . For the resulting compositions of the composite, we estimate the levels of local fields of other properties and build corridor graphs.

Discussion of the results of the research. For the IP analysis of the quality criteria of the decorative composite, the second method of visualization of the statistical testing of material compositions was used [2, 11]. With this method, the property values were scanned along the axis of one of the x_1 and x_2 factors.

Fig. 3 shows "corridor" graphs for physical and mechanical properties, the values of which are determined under isorheological conditions $\tau\{P_m=35\}$ of the mixture. The change in the characteristics of concrete is associated with an increase in zeolite from 0.2 to 7.3 p.m. At the same time, to maintain ongoing viability, the content of fine sand in a mixture with coarse sand should decrease from 62 to 30.3 p.m. With such dosages of zeolite and fine sand, the compressive strength f_{cm} and flexural tensile strength f_{ctfm} of concrete increase by 22.8 % and 14.3 %, respectively. Here it is worth noting that all isorheological compositions of the compositions are characterized by the regulatory requirement for $f_{cm} \geq 50$ MPa. However, under such conditions of factors x_1 and x_2 , the situation with regard to the coefficient of technological damage of concrete changes in the opposite way. With an increase in the content of small grains of sand x_2 in a mixture with large (to ≈ 55 p.m.), with small dosages of zeolite ($x_1 < 0$), K_T grows at 12.3 %. Some interest is observed in the water absorption of the composite. As the replacement of cement with pozzolana increases (up to 4 p.m.), the average density decreases $\rho_{c,d}$, however, the ability of concrete to saturate with water also decreases $W_m \approx 11.6$ %.

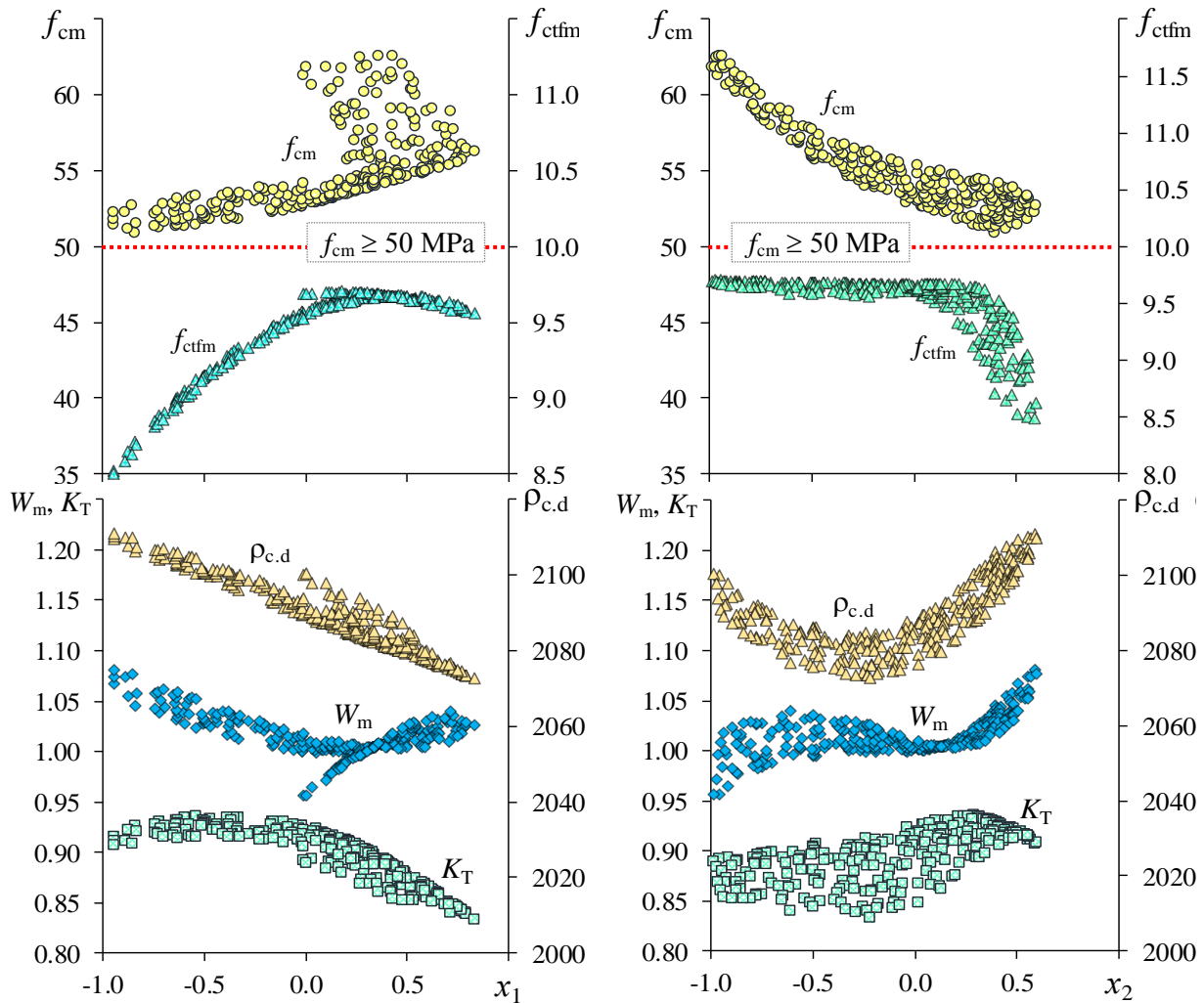


Fig. 3. Results of IP analysis of quality criteria for compositions with viability $\tau = 1.0 \pm 0.05$ hour with independent control of zeolite x_1 or sand granulometry x_2 in the range $-1 \leq x_i \leq +1$

The results of statistical testing of composite compositions in isosthenic conditions are presented in Fig. 4. The analysis of property estimates on these charts allows us to draw a number of conclusions. An increase in the content of zeolite grains, as well as the fraction of fine sand in the aggregate mixture, leads to the reduced shelf life of compositions by approximately 58 %. In addition, 245 of 583 compositions do not meet the requirement for $\{P_m=35\} \geq 0.95$ hour. However, in such conditions, the flexural strength of concrete f_{ctfm} increases by about 17 %. At the same time, with a further increase in the grains of the fine fraction of sand from 57 p.m. (or $x_2 = +0.39$) in the aggregate mixture, f_{ctfm} decreases by ≈ 12 %. It is also worth recognizing that the average density decreases and the damage of the material increase K_T . At the same time, the minimum values of water absorption W_m are possessed by concrete compositions made on coarse-grained sand, the content of fine grains x_2 in the sand mixture should be ≈ 33 p.m. per 100 p.m. placeholder. A comparative analysis of the results obtained by the IP-analysis method on the influence of zeolite and sand aggregate granulometry on the characteristics of the decorative composite (Fig. 3 and 4) demonstrates that an engineering compromise between x_1 and x_2 should be sought in the area of their main levels of variation, i.e. $X_1(Z) \approx 4$ p.m. and $X_2(SG) = 50$ p.m.

Conclusions. Computer experiments on isoparametric analysis on local fields of characteristics of building materials are an effective tool for obtaining new materials science information. According to the results of the IP-analysis of the functional properties of the decorative composite, the area of compromise ratios between zeolite and fine-grained aggregate is fairly reliably determined. However, the coordinates of their optimal amount do not match according to all criteria. Introducing finely dispersed zeolite instead of a part of cement is a technologically valuable technique for improving the quality and durability of non-reinforced decorative concrete.

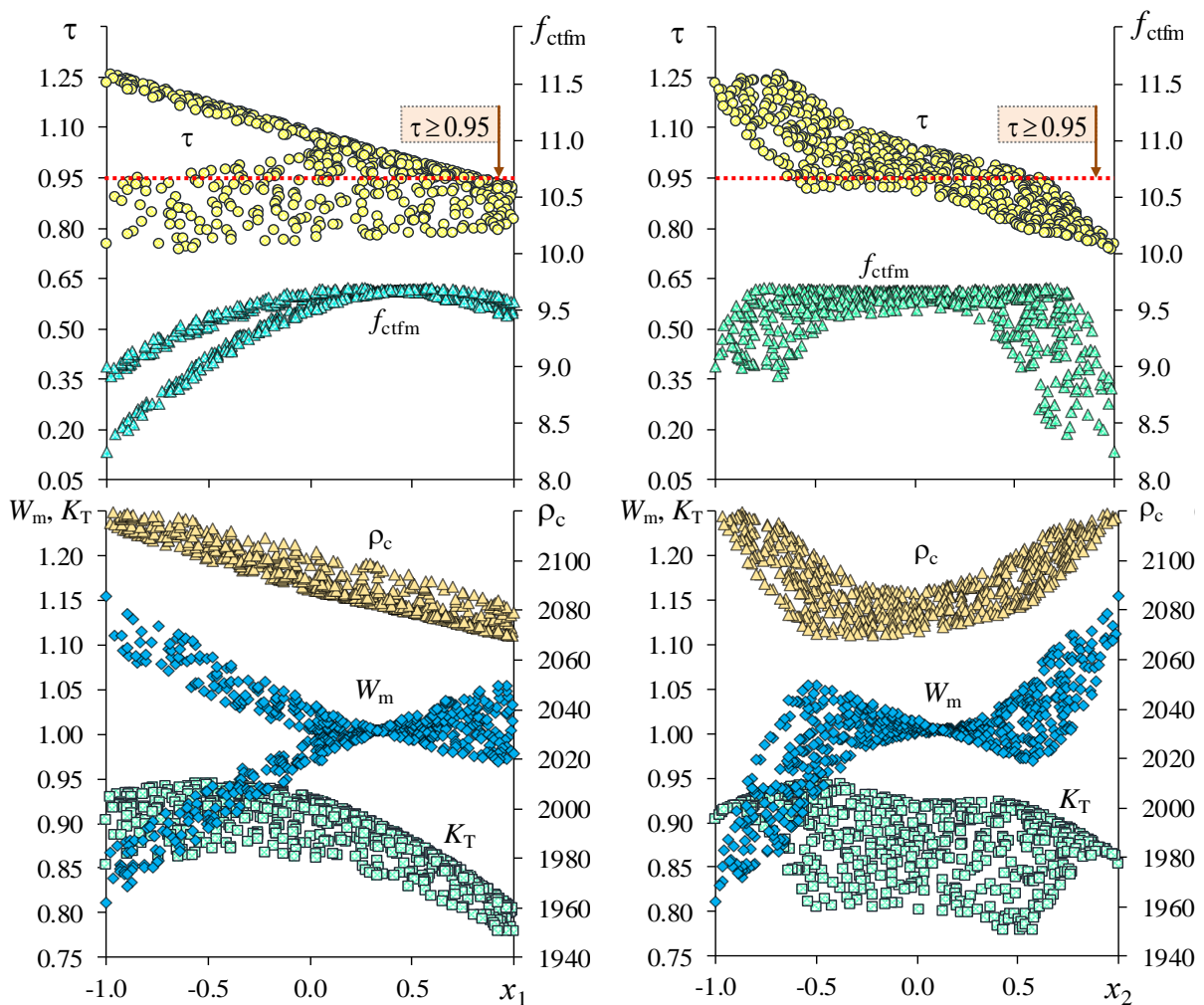


Fig. 4. Changing the quality criteria of composite compositions at different levels of factors x_1 and x_2 of the matrix, which ensure constant strength $f_{cm} = 56 \pm 3.15$ MPa

References

- [1] P.M. Dovgan, "Dispersno-armovani dekorativni betoni dlya arhitekturnih elementiv", dis. ... k-ta tekhn. nauk: 05.23.05, Odes'ka derzhavna akademiya budivnictva ta arhitekturi. Odesa, 2021.
- [2] V.A. Voznesensky, *Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyah*. Moskva: Finansy i statistika, 1981.
- [3] T.V. Lyashenko, V.A. Voznesensky, *Metodologiya recepturno-tekhnologicheskikh polej v komp'yuternom stroitel'nom materialovedenii*. Odessa: Astroprint, 2017.
- [4] P.-C. Aïtcin, *High-Performance Concrete* (Taylor & Francis), 2004.
- [5] T.A. Holm, J.P. Ries, "Specified density concrete – A transition", *2nd International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete* (Kristiansand, Norway), pp. 37-46, 2000.
- [6] S. Aroni et.al., *Autoclaved Aerated Concrete: Properties Testing and Design*. Rilem Recommended Practice. CRC Press, 1993.
- [7] V.N. Heggade, "Performance Specified Concrete Based on Permeability Crack Ability", *The Bridge and Structural Engineer, Journal of ING-IABSE*, vol. 30, no. 4, pp. 1-13, 2000.
- [8] E.S. Shinkevich, "Optimizaciya struktury yacheistogo silikatnogo betona po kompleksu kriteriev kachestva na osnove izoparametricheskogo analiza": dis. ... k-ta tekhn. nauk: 05.23.05, Kraskovo, 1985.
- [9] T.V. Lyashenko, A.D. Dovgan, "Isoparametric analysis when studying composite materials", *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, vol. 66, pp. 72-78, 2017.
- [10] S.V. Ryabykh, V.A. Voznesensky, S.V. Koval, T.V. Lyashenko, "Modelirovanie vliyaniya

- recepturno-tehnologicheskikh i ekspluatacionnyh faktorov na veroyatnostnye pokazateli kachestva kompozitov": *sb. nauch. trud.* Kiev: UMVK VO Minvuza, pp. 4-12, 1990.
- [11] V.A. Voznesensky, T.V. Lyashenko, A.D. Dovgan, "Izoparametricheskij analiz v komp'yuternom materialovedenii stroitel'nyh kompozitov", *Zb. nauk. pr. Lugans'kogo nacional'nogo universitetu*, no. 40(52), pp. 240-248, 2004.
- [12] A.D. Dovgan, V.P. Gavrilyuk, "Izoparametricheskij analiz svojstv melkozernistogo betona, armirovannogo steklyannoju i polimernoju fibroj", *Visnik Odes'koj derzhavnoj akademii budivnictva ta arhitekturi*, vol. 60, pp. 91-95, 2015.
- [13] T.V. Lyashenko, A.D. Dovgan, P.M. Dovgan, "Fibre-reinforced decorative composite: the effects of composition on the strength", *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, vol. 73, pp. 89-97, 2018.
- [14] V.G. Sukhanov, V.N. Vyrovoy, O.A. Korobko, *Struktura materiala v strukture konstrukcii: monografiya*. Odessa: «Poligraf», 2016.

АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕКОРАТИВНОГО БЕТОНУ В ІЗОПАРАМЕТРИЧНИХ УМОВАХ КРИТЕРІЇВ ОПТИМАЛЬНОСТІ

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

¹Ляшенко Т.В., д.т.н., професор,
frabul16@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6232-4866

¹Хлищов М.В., к.т.н., доцент,
khlytsov@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0003-3486-6833

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

Анотація. У статті представлено два методи комп'ютерного матеріалознавства для аналізу функціональних властивостей декоративного бетону. *Метод експериментально-статистичного моделювання* застосовано для побудови нелінійних структурованих моделей, які описують поля фізико-механічних і технологічних властивостей матеріалу в координатах п'яти факторів складу. Дослідження впливу рецептурних факторів на характеристики композиту виконано по симетричному трьохрівневому 27-ми точковому плану. Залежно від характеру дії на декоративний композит варійовані сировинні матеріали об'єднані в дві групи факторів – модифікації цементно-піщаної системи, параметри дисперсного армування. Порівняльний аналіз локальних полів властивостей армованих і неармованих складів матеріалу показав доцільність армування цементно-піщаної матриці гібридними скловолкнами. Однак виходячи із мети роботи – для управління характеристиками декоративного неармованого композиту, при умові постійного рівня одного із його критеріїв, застосовано *метод ізопараметричного аналізу*. Зміну критеріїв якості складів композиту проаналізовано в двох версіях ізопараметрії. В першій всі розчинні суміші характеризувалися однаковою життєздатністю в межах часу $\tau = 1.0 \pm \Delta\tau$, в другій – всі склади бетону були ізостенічними в межах міцності на стиск $f_{cm} = 56 \pm \Delta f_{cm}$. Для статистичного випробування характеристик матеріалу спільно з експериментально-статистичними моделями використано метод Монте-Карло. За результатами ізопараметричного аналізу функціональних властивостей декоративного композиту достатньо достовірно визначається область компромісних співвідношень між цеолітом і дрібнозернистим заповнювачем, проте координати їх оптимальної кількості по всіх критеріях не співпадають. Аналіз отриманих результатів цим методом демонструє, що інженерний компроміс між вказаними факторами варто шукати в області їх основних рівнів варіювання. Введення тонкодисперсного цеоліту взамін частини цементу є технологічно корисним прийомом для підвищення якості та довговічності неармованого декоративного бетону.

Ключові слова: декоративний бетон, цеоліт, фібра, міцність, ізопараметричний аналіз, експериментально-статистична модель, комп'ютерний експеримент, постійний рівень властивості.

Стаття надійшла до редакції 6.12.2022

ВПЛИВ КІЛЬКОСТІ ФІБРИ І СУПЕРПЛАСТИФІКАТОРУ НА МІЦНІСТЬ БЕТОНІВ ЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ

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

¹**Полторапавлов А.О.**,
andpolt90@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7044-4203

¹**Мішутін А.В.**, д.т.н., професор,
mishutin52@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9512-6084

¹**Заволока М.В.**, к.т.н., професор,
mvzavoloka@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2080-1230

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

Анотація. За оптимальним планом було проведено експеримент, в якому варіювалися наступні фактори складу бетонів жорстких дорожніх покриттів: кількість портландцементу (від 350 до 450 кг/м³), кількість поліпропіленової фібри з довжиною волокон 39 мм та еквівалентним діаметром 0,45 мм (від 0 до 3 кг/м³), кількість суперпластифікатору на основі полікарбоксилатів (від 1 до 2%). Всі бетонні суміші мали рівну рухомість S1, що досягалося підбором кількості води у складі з відповідним корегуванням складу бетону. Встановлено, що при зростанні кількості портландцементу у складі бетону В/Ц сумішей рівної рухомості очікувано знижується. За рахунок підвищення кількості суперпластифікатору з 1 до 2% від маси цементу В/Ц суміші знижується на 10-12%. При введенні поліпропіленової фібри у кількості до 1,5 кг/м³ В/Ц суміші практично не змінюється, але при підвищенні кількості фібри до 2,5-3 кг/м³ В/Ц відчутно зростає.

Міцність бетонів і фібробетонів визначалася у віці 3-х і 28-ми діб. Встановлено, що у віці 3-х діб міцність на стиск досліджених бетонів становить 63-69% від їх міцності у проектному віці. За рахунок підвищення кількості суперпластифікатору до 2% міцність на стиск у віці 3-х діб зростає на 4,5-6 МПа, у віці 28-ми діб – на 7-9 МПа. У ранньому та у проектному віці при зростанні кількості поліпропіленової фібри до 1,5-1,8 кг/м³ міцність на стиск бетону підвищується в середньому на 3 МПа. Подальше підвищення кількості фібри вже негативно відображається на міцності бетону. У ранньому віці вплив кількості в'язучого на міцність на розтяг при згині бетонів є більш відчутним, ніж у проектному. За рахунок збільшення кількості портландцементу з 350 до 450 кг/м³ у віці 3-х діб міцність на розтяг при згині підвищується в середньому на 1,4 МПа, а у віці 28-ми діб – на 0,5 МПа. Найбільшу міцність на розтяг при згині мають бетони з кількістю суперпластифікатору 1,7-1,8%. Завдяки застосуванню дисперсного армування міцність на розтяг досліджених бетонів підвищується на 0,3-0,5 МПа. При застосуванні раціональної кількості добавки і фібри міцність на розтяг при згині досліджених бетонів складає не менш 6 МПа, що відповідає класу B_{btb}4,8. Згідно вимог ДБН В.2.3-4:2015 такі бетони можуть використовуватися для покриттів доріг будь якої категорії.

Ключові слова: жорстке покриття автомобільних доріг, модифікований фібробетон, поліпропіленова фібра, суперпластифікатор, міцність.

Вступ. Жорсткі цементобетонні покриття рік від року все більше використовуються при будівництві доріг у розвинутих країнах світу. В Україні частка доріг з цементобетонними покриттями в останні роки також зростає. Широке застосування жорстких дорожніх покриттів обумовлено їх суттєвими перевагами. Головна економічна перевага – це велика довговічність, яка забезпечує зниження експлуатаційних витрат. Цементобетон розподіляє навантаження на більшу площу земляного полотна в порівнянні з

більш «гнучким» асфальтобетоном. На цементобетонних дорогах не виникає колійності та хвилеподібних утворень. За рахунок меншого прогину дорожнього полотна економиться паливо, що є економічною і екологічною перевагою. Також екологічною перевагою цементобетонних покриттів є те, що вони не містять шкідливих нафтопродуктів, здатних проникати у ґрунт.

При цьому задача розробки ефективних бетонів дорожніх покриттів залишається актуальною. При її вирішенні важливим є забезпечення максимально можливого використання вітчизняних компонентів, як в'язучих, так і модифікаторів. При виготовленні фібробетонів, які показали свою ефективність в дорожньому будівництві, також слід надавати перевагу вітчизняним волокнам, номенклатура яких постійно розширюється. Спричинене бойовими діями руйнування дорожньої інфраструктури України додатково актуалізує задачу розробки ефективних дорожніх бетонів на основі вітчизняних компонентів.

Аналіз досліджень і публікацій. У США частка бетонних дорожніх та аеродромних покриттів становить близько 60%, у країнах західної Європи – від 10 до 40% [1]. Для влаштування найбільш навантажених транспортних розв'язок широко використовуються високоефективні дисперсно-армовані бетони [2-4]. Застосування фібри підвищує міцність на розтяг при згині бетону, що дозволяє зменшити товщину дорожньої плити, знижує усадочні деформації, підвищує зносостійкість і морозостійкість матеріалу [2, 5-7].

У якості дисперсної арматури використовуються волокна різних типів. При виготовленні бетонів дорожніх покриттів найбільш розповсюдженими є поліпропіленові, базальтові та сталеві волокна [6-8]. Поліпропіленові волокна є одними з найбільш ефективних з врахуванням їх вартості та корозійної стійкості в типових умовах експлуатації покриттів. Наприклад у [9] показано, що використання фібробетону з поліпропіленовою фіброю є економічно вигідним рішенням для доріг, яке забезпечує необхідну міцність та безпеку покриття. У [10] показано, що дисперсне армування поліпропіленовою фіброю дозволяє підвищити міцність і морозостійкість бетону дорожнього покриття фактично на тому ж рівні, що і використання металевої фібри. При цьому за рахунок меншої необхідної кількості фібри у складі бетону вартість дисперсного армування поліпропіленовою фіброю є меншою. У [11] показано, що поліпропіленові волокна дозволяють зменшувати ширину розкриття тріщин в покритті.

Слід відзначити, що раціональна кількість фібри суттєво розрізняється в залежності від геометричних розмірів волокон і особливостей складу бетону. У [12] максимальна міцність на стиск і на розтяг при згині бетону дорожнього покриття класу В35 була досягнута при введенні поліпропіленових волокон довжиною 12 і 20 мм у кількості 0,4%. При цьому фібра значно підвищувала стійкість бетону до багаторазового навантаження. У [7] встановлено, що раціональним з позиції забезпечення міцності та довговічності бетону дорожнього покриття є введення поліпропіленової фібри довжиною 12 мм у кількості 1,2-2,0 кг/м³. У [10] встановлено, що раціональною кількістю фібри довжиною 36 мм є 3 кг/м³. Тобто для кожного виду волокон слід визначати їх раціональну кількість з врахуванням особливостей бетонної суміші та економічної доцільності.

Також слід відзначити, що якість роботи дисперсного волокна в бетоні суттєво залежить від його зчеплення з матрицею. На таке зчеплення впливає не лише тип поверхні волокон, а і міцність бетону та особливості розподілу заповнювача [13, 14]. Відповідно в залежності від рухомості суміші та особливостей її складу необхідно корегувати кількість дисперсної арматури для підвищення її ефективності.

Пластифікуючі добавки на сьогодні є фактично обов'язковим компонентом бетонних сумішей, але при застосуванні дисперсного армування раціональна кількість модифікатору може відрізнятись від його раціональної кількості для неармованого бетону. Тобто кількість модифікаторів також має коректуватися в залежності від типу дисперсного армування та інших особливостей складу бетону [7, 15, 16].

Відповідно задача розробки ефективних фібробетонів дорожніх покриттів має вирішуватися з врахуванням викладених вище особливостей та наявної сировинної бази.

Метою роботи є визначення впливу кількості поліпропіленової фібри і

суперпластифікатору на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів в ранньому і проектному віці.

Матеріали і методи досліджень. В дослідженнях властивостей бетонів і фібробетонів використовувалися перелічені нижче матеріали:

- портландцемент ПЦ II/A-K(III-B)-500P виробництва ТОВ «Цемент» (м. Одеса);
- кварцовий пісок Микитівського кар'єру (Миколаївська область) з модулем крупності 2,59, митий;
- гранітний щебінь фракції 5-20 мм;
- добавка суперпластифікатор на основі полікарбоксилатів STACHEMENT 2570/5/G виробництва ТОВ «Стахема Львів-сервіс» (м. Львів);
- поліпропіленова фібра «X Mesh» з довжиною волокон 39 мм та еквівалентним діаметром 0,45 мм виробництва ТОВ «ДІФ» (м. Дніпро).

Дослідження проводилися за оптимальним 15-ти точковим 3-х факторним планом [17, 18]. При проведенні експерименту варіювалися наступні фактори складу бетону:

- X_1 , кількість портландцементу, від 350 до 450 кг/м³;
- X_2 , кількість поліпропіленової фібри, від 0 до 3 кг/м³;
- X_3 , кількість добавки суперпластифікатору, від 1 до 2% від маси цементу.

План експерименту і склади досліджених бетонів і фібробетонів наведені у таблиці 1.

Всі суміші мали рівну рухомість S1, значення осадки конусу складало від 2 до 3 см, що досягалося підбором кількості води у складі з відповідним корегуванням складу бетону. Така рухомість була обрана як типова для бетонів дорожніх покриттів при їх укладанні з застосуванням бетоно-укладальника з ковзаючою опалубкою.

Бетонні зразки кубу розміром 10×10×10 см і призми розміром 10×10×40 см виготовляли згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Визначення міцності бетонів на стиск і міцності на розтяг при згині проводилося у віці 3 і 28 діб згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009.

Таблиця 1 – План експерименту і склади досліджених бетонів і фібробетонів

| № точки | Рівні факторів | | | Склад бетону (кг/м ³) | | | | | |
|---------|-------------------------|----------------|------------------|-----------------------------------|--------|-------|-------|---------|------|
| | X_1 портландцемент | X_2 фібра | X_3 добавка | Портландцемент | Щебінь | Пісок | Фібра | Добавка | Вода |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 350 | 1270 | 680 | 0 | 3,50 | 157 |
| 2 | -1 | -1 | 1 | 350 | 1270 | 700 | 0 | 7,00 | 145 |
| 3 | -1 | 0 | 0 | 350 | 1270 | 690 | 1,5 | 5,25 | 148 |
| 4 | -1 | 1 | -1 | 350 | 1270 | 675 | 3 | 3,50 | 162 |
| 5 | -1 | 1 | 1 | 350 | 1270 | 695 | 3 | 7,00 | 143 |
| 6 | 0 | -1 | 0 | 400 | 1250 | 640 | 0 | 6,00 | 148 |
| 7 | 0 | 0 | -1 | 400 | 1250 | 635 | 1,5 | 4,00 | 161 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 400 | 1250 | 640 | 1,5 | 6,00 | 151 |
| 9 | 0 | 0 | 1 | 400 | 1250 | 645 | 1,5 | 8,00 | 145 |
| 10 | 0 | 1 | 0 | 400 | 1250 | 635 | 3 | 6,00 | 167 |
| 11 | 1 | -1 | -1 | 450 | 1230 | 585 | 0 | 4,50 | 165 |
| 12 | 1 | -1 | 1 | 450 | 1230 | 600 | 0 | 9,00 | 145 |
| 13 | 1 | 0 | 0 | 450 | 1230 | 585 | 1,5 | 6,75 | 151 |
| 14 | 1 | 1 | -1 | 450 | 1230 | 580 | 3 | 4,50 | 171 |
| 15 | 1 | 1 | 1 | 450 | 1230 | 590 | 3 | 9,00 | 155 |

Результати досліджень. Суміші всіх досліджених бетонів і фібробетонів мали рівну рухомість S1, відповідно їх В/Ц залежало від складу. Експериментально-статистична (ЕС) модель [17-19], що описує вплив варійованих факторів на В/Ц суміші має вигляд:

$$\begin{aligned} \text{В/Ц} = & 0,380 - 0,040x_1 \pm 0x_1^2 + 0,003x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\ & + 0,009x_2 + 0,013x_2^2 \pm 0x_2x_3 \\ & - 0,021x_3 \pm 0x_3^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Поле даної ЕС-моделі [19] має мінімальне значення $\text{В/Ц}_{\min} = 0,316$ у точці з координатами $x_1 = x_3 = 1$, $x_2 = -0,74$ і максимальне значення $\text{В/Ц}_{\max} = 0,461$ у точці з координатами $x_1 = x_3 = -1$, $x_2 = 1$. Тобто найменше В/Ц прогнозовано мають бетонні суміші з максимальною кількістю портландцементу (450 кг/м^3) і суперпластифікатору (2%) та практично без фібри. Найбільше В/Ц фіксується для суміші з мінімальною кількістю портландцементу (350 кг/м^3) і суперпластифікатору (1%) та максимальною кількістю фібри (3 кг/м^3).

За ЕС-моделлю (1) була побудована діаграма у формі куба, яка показана на рис. 1.

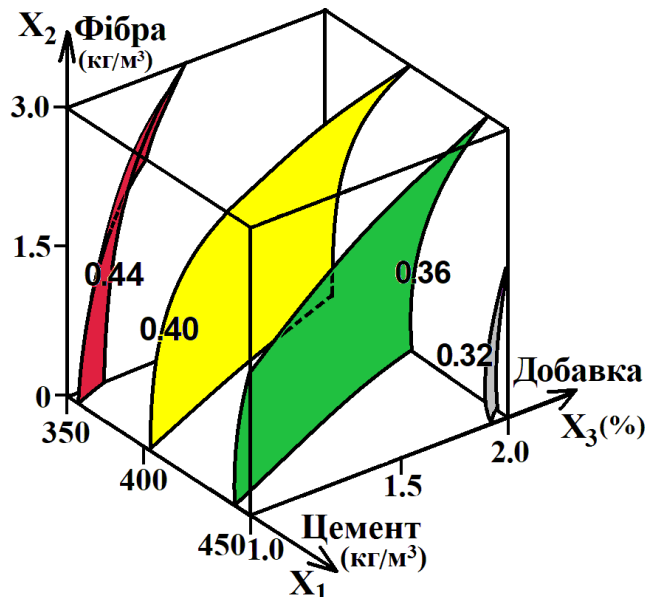


Рис. 1. Вплив варійованих факторів складу на В/Ц бетонної суміші рівної рухомості

Аналіз ЕС-моделі (1) і діаграми на рис. 1 показує, що при зростанні кількості портландцементу у складі бетону В/Ц бетонної суміші рівної рухомості очікувано знижується. За рахунок підвищення кількості суперпластифікатору з 1 до 2% від маси цементу В/Ц суміші знижується на 10-12%. При введенні поліпропіленової фібри у кількості до $1,5 \text{ кг/м}^3$ В/Ц суміші практично не змінюється. Тобто використання такої кількості волокна майже не потребує додаткового введення води для збереження рівної рухомості суміші. Але при підвищенні кількості фібри до $2,5-3 \text{ кг/м}^3$ В/Ц суміші зростає на 5-6%, що еквівалентно зростанню кількості води у складі бетону на $8-10 \text{ л/м}^3$.

Міцність бетонів на стиск і на розтяг при згині бетонів визначалася в ранньому і проектному віці. ЕС-моделі, що відображають вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск досліджених бетонів і фібробетонів у віці відповідно 3-х і 28 діб мають вигляд:

$$\begin{aligned} f_{\text{cm.3}} (\text{МПа}) = & 47,84 + 2,49x_1 \pm 0x_1^2 \pm 0x_1x_2 - 1,28x_1x_3 \\ & \pm 0x_2 - 2,80x_2^2 - 1,13x_2x_3 \\ & + 2,80x_3 \pm 0x_3^2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 f_{cm} \text{ (МПа)} = & 73,04 + 6,53x_1 - 1,43x_1^2 + 0,76x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\
 & + 0,95x_2 - 2,03x_2^2 - 1,04x_2x_3 \\
 & + 4,39x_3 - 2,53x_3^2
 \end{aligned} \quad (3)$$

Поля [19] ЕС-моделей (2) і (3) мають мінімальні значення $f_{cm.3.min} = 37,31$ МПа і $f_{cm.min} = 54,91$ МПа у точці з координатами $x_1 = x_2 = x_3 = -1$. Тобто як у віці 3-х діб, так і у віці 28-ми діб найменшу міцність на стиск має бетон з мінімальною кількістю портландцементу, без фібри і з мінімальною кількістю суперпластифікатору. Максимальне значення міцності у віці 3-х діб $f_{cm.3.max} = 51,97$ МПа має склад у точці з координатами $x_1 = x_3 = 1$, $x_2 = -0,09$. У віці 28-ми діб максимальне значення міцності $f_{cm.max} = 80,14$ МПа має склад у точці з координатами $x_1 = x_3 = 1$, $x_2 = 0,21$. Тобто найбільшу міцність при стиску у ранньому та проектному віці мають склади фібробетонів з максимальною кількістю портландцементу і суперпластифікатору та з кількістю дисперсної арматури, близькою до середини діапазону варіювання, тобто приблизно $1,5 \text{ кг/м}^3$.

Побудовані за ЕС-моделями (2) і (3) діаграми показані на рис. 2.

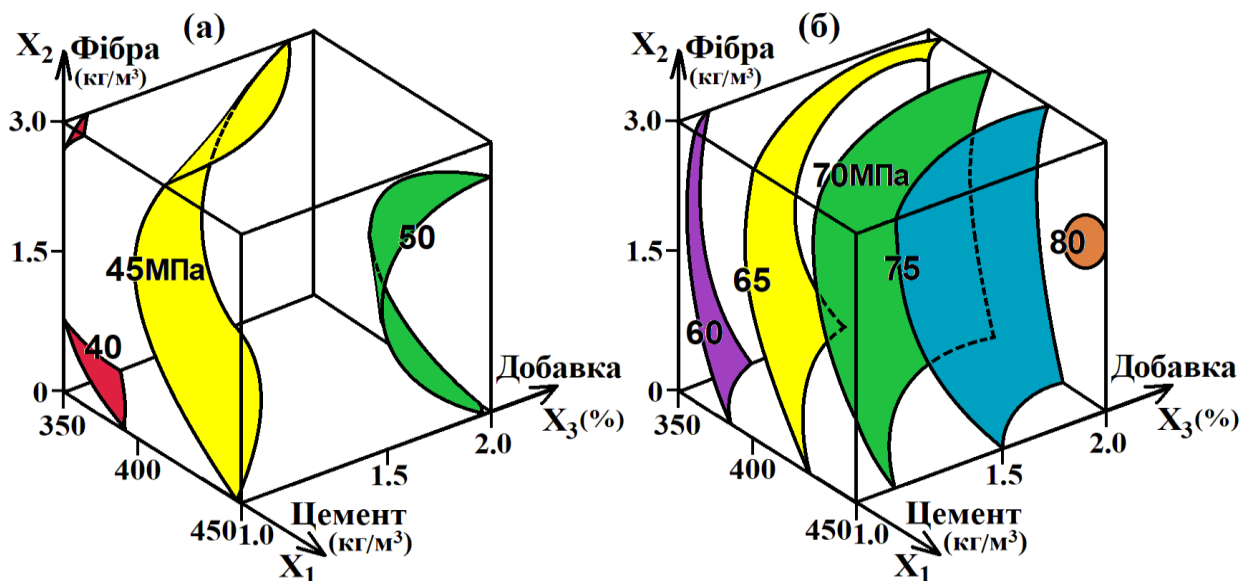


Рис. 2. Вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск бетонів і фібробетонів: а – у віці 3-х діб, б – у віці 28-ми діб

Як видно з діаграм на рис. 2, вже у віці 3-х діб міцність на стиск досліджених бетонів і фібробетонів становить 63-69% від їх міцності у проектному віці. Це досягається насамперед завдяки застосуванню портландцементу ПЦ II/A-K(III-B)-500P, тобто з підвищеною ранньою міцністю, а також ефективного суперпластифікатору полікарбоксилатного типу. По мірі зростання кількості портландцементу у складі бетонів їх міцність прогнозовано збільшується, при цьому при підвищенні кількості в'язучого з 350 до 400 кг/м^3 міцність зростає більш відчутно, ніж за рахунок подальшого підвищення кількості в'язучого з 400 до 450 кг/м^3 .

За рахунок підвищення кількості суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G з 1 до 2% від маси портландцементу міцність на стиск бетонів і фібробетонів у віці 3-х діб зростає на 4,5-6 МПа, у віці 28-ми діб – на 7-9 МПа. Це є результатом суттєвого зниження В/Ц суміші при застосуванні даного модифікатору. При цьому у діапазоні варіювання кількості суперпластифікатору від 1,6 до 2% міцність бетонів змінюється неістотно і є близькою до максимальної, тобто таку кількість модифікатору можна вважати раціональною.

У ранньому та у проектному віці по мірі зростання у складі бетону кількості поліпропіленової фібри до $1,5-1,8 \text{ кг/м}^3$ його міцність на стиск підвищується в середньому на 3 МПа. Подальше підвищення кількості фібри вже негативно відображається на міцності бетону, що можна пояснити впливом дисперсного армування на В/Ц суміші.

В цілому модифіковані фібробетони при раціональній кількості суперпластифікатору і дисперсної арматури у проектному віці мають міцність від 65 до 80 МПа в залежності від кількості портландцементу. Вже у віці 3-х діб модифіковані фібробетони раціональних складів мають міцність на стиск від 45 до 54 МПа, що спрощує виконання подальших технологічних процесів при будівництві автодоріг і у разі необхідності дозволяє прискорити відкриття руху транспорту по ділянці дороги, що будується.

Конструкції жорстких дорожніх покриттів працюють в умовах різноспрямованих навантажень від дії транспорту, що рухається. Відповідно для бетонів дорожніх покриттів важливим показником якості є міцність на розтяг при згині. Характеристика міцності бетону на розтяг приймається як одна з основних при розрахунку конструкції доріг з жорстким покриттям [2, 20]. ЕС-моделі, що відображають вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині бетонів і фібробетонів у віці 3-х і 28-ми діб мають вигляд:

$$f_{c.tf.3} \text{ (МПа)} = 5,28 + 0,71x_1 \pm 0x_1^2 + 0,16x_1x_2 + 0,15x_1x_3 + 0,16x_2 \pm 0x_2^2 - 0,15x_2x_3 + 0,46x_3 - 0,33x_3^2 \quad (4)$$

$$f_{c.tf} \text{ (МПа)} = 6,48 + 0,23x_1 \pm 0x_1^2 \pm 0x_1x_2 - 0,14x_1x_3 + 0,07x_2 - 0,22x_2^2 \pm 0x_2x_3 + 0,30x_3 - 0,23x_3^2 \quad (5)$$

Для даних ЕС-моделей поля властивостей мають мінімальні значення $f_{c.tf.3.min} = 3,80$ МПа і $f_{c.tf.min} = 5,31$ МПа у точці з координатами $x_1 = x_2 = x_3 = -1$. Тобто найменшу міцність на розтяг при згині має бетон з мінімальною кількістю портландцементу, без фібри і з мінімальною кількістю суперпластифікатору, що аналогічно складу, який характеризується найменшою міцністю на стиск. Максимальне значення міцності на розтяг при згині у віці 3-х діб $f_{c.tf.3.max} = 6,41$ МПа має склад у точці з координатами $x_1 = x_2 = 1, x_3 = 0,71$, тобто при максимальній кількості портландцементу і фібри та з кількістю суперпластифікатору приблизно 1,8%. У віці 28-ми діб максимальне значення міцності на розтяг при згині $f_{c.tf.max} = 6,74$ МПа має склад бетону у точці з координатами $x_1 = 1, x_2 = 0,16, x_3 = 0,36$, тобто при максимальній кількості портландцементу, з кількістю фібри приблизно 1,8 кг/м³ та суперпластифікатору приблизно 1,7%.

Побудовані за ЕС-моделями (4) і (5) діаграми показані на рис. 3.

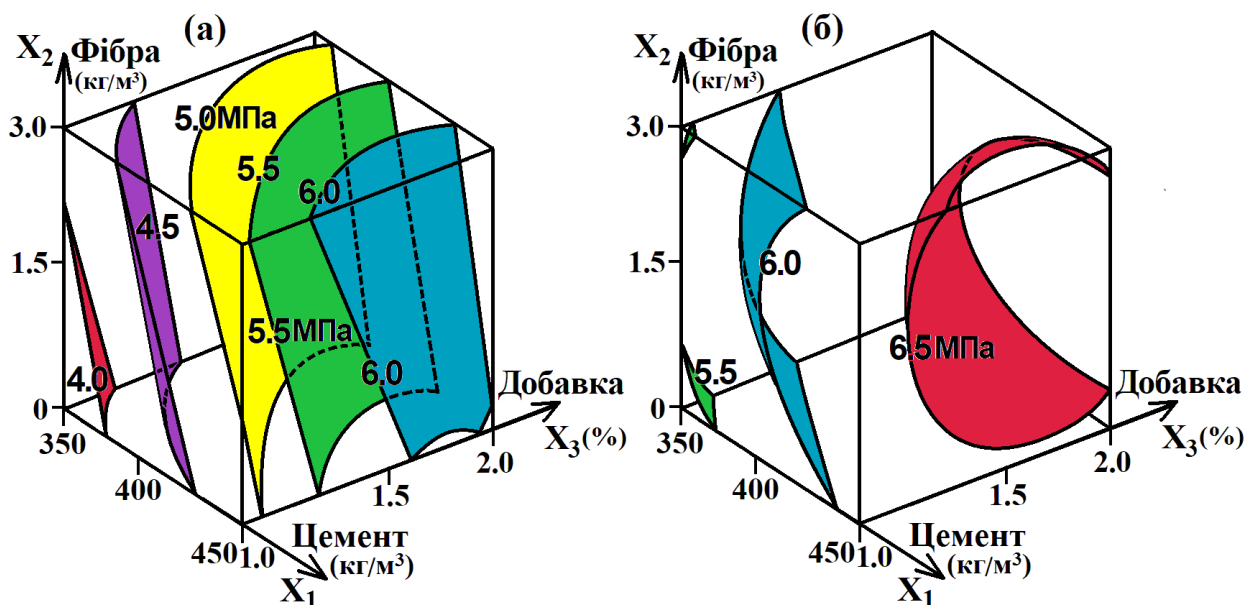


Рис. 3. Вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині бетонів і фібробетонів: а – у віці 3-х діб, б – у віці 28-ми діб

Як видно з показаних на рис. 3 діаграм, по мірі зростання кількості портландцементу міцність на розтяг при згині досліджених бетонів і фібробетонів очікувано підвищується. У ранньому віці вплив кількості в'язучого на величину $f_{c,tf}$ є більш відчутним, ніж у проєктному віці. За рахунок збільшення кількості портландцементу з 350 до 450 кг/м³ у віці 3-х діб міцність на розтяг при згині бетону підвищується в середньому 1,4 МПа, а у віці 28м діб – на 0,5 МПа. Це може бути пояснено зменшенням впливу міцності самої цементно-піщаної матриці на опір напруженням, що виникають при розтягуванні, у порівнянні з впливом її адгезії до крупного заповнювача при зростанні віку композиту.

Незалежно від віку найбільшу міцність на розтяг при згині мають бетони з кількістю суперпластифікатору 1,7-1,8% від маси цементу, що майже співпадає з діапазоном кількості добавки, який забезпечував найбільшу міцність при стиску. Завдяки застосуванню дисперсного армування міцність на розтяг при згині досліджених бетонів підвищується на 0,3-0,5 МПа. У ранньому віці більша ефективність простежується при застосуванні максимальної кількості фібри, а у проєктному віці – при кількості 1,5-1,8 кг/м³, що аналогічно діапазону, який забезпечував також найбільші показники щодо міцності на стиск. Такий ефект від зміни кількості фібри у складі можна пояснити її впливом на В/Ц суміші, що описано вище. Слід відмітити, що фібра використовувалася в даних бетонах не лише для покращення їх міцності, а і довговічності [7].

В цілому при застосуванні раціональної кількості добавки і фібри міцність на розтяг при згині досліджених бетонів складає не менш 6 МПа, що відповідає класу $B_{btb}4,8$. Згідно вимог ДБН В.2.3-4:2015 [20] такі бетони можуть використовуватися для жорстких дорожніх покриттів доріг будь якої категорії.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведені з використанням методів оптимального планування експерименту дослідження дозволили визначити вплив кількості добавки суперпластифікатору на основі полікарбоксилатів і поліпропіленової фібри на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів. Встановлено, що раціональним з точки зору досягнення більшої міцності як у віці 3-х, так і 28-ми діб є використання добавки STACHEMENT 2570/5/G у кількості 1,7-1,8% від маси цементу та поліпропіленової фібри «X Mesh» з довжиною волокон 39 мм у кількості 1,5-1,8 кг/м³. Навіть при мінімальній кількості цементу у складі міцність таких бетонів на стиск складає не менш 65 МПа, на розтяг при згині – не менш 6,0 МПа, що дозволяє використовувати їх для жорстких дорожніх покриттів доріг усіх категорій, включаючи першу. При будівництві найбільш завантажених ділянок доріг можна використовувати модифіковані фібробетони з підвищеною до 400-450 кг/м³ кількістю цементу у складі, що забезпечить більшу конструктивну надійність покриття.

У подальшому передбачено дослідження впливу кількості суперпластифікатору і поліпропіленової фібри на довговічність бетонів жорстких дорожніх покриттів, яка в типових умовах експлуатації автомобільних доріг України обумовлюється насамперед морозостійкістю і зносостійкістю бетону.

Література

1. K. Hall, D. Dawood, S. Vanikar and other. Long-life Concrete Pavements in Europe and Canada. Report No. FHWA-PL-07-027, American Trade Initiatives, 2007. 69 p.
2. Hussain I., Ali B., Akhtar T., Jameel M.S., Raza S.S. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). *Case Studies in Construction Materials*. 2020. 13. e00429. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>.
3. Jaral M., Firdous E.S. A review study on the steel fiber reinforced concrete pavement. *International journal of scientific development and research*. 2018. 3 (4). pp. 311-313.
4. Hamim O.F., Aninda S.S., Hoque M.S., Hadiuzzaman M. Suitability of pavement type for developing countries from an economic perspective using life cycle cost analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2021. 14. 259–266. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0107-z>.

5. Affan M., Ali M. Experimental investigation on mechanical properties of jute fiber reinforced concrete under freeze-thaw conditions for pavement applications. *Construction and Building Materials*. 2022. 323. 126599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126599>.
6. Kos Ž., Kroviakov S., Kryzhanovskiy V., Grynyova I. Research of strength, frost resistance, abrasion resistance and shrinkage of steel fiber concrete for rigid highways and airfields pavement repair. *Applied Sciences*. 2022. 12 (3). 1174. <https://doi.org/10.3390/app12031174>.
7. Kroviakov S., Mishutin A., Chintea L. Multi-criteria optimization of the fiber concretes compositions of rigid pavement. *Mechanics and mathematical methods*, 2021, 3 (1). pp. 62-71. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2021-3-1-62-71>.
8. Sarkar A., Hajihosseini M. The effect of basalt fibre on the mechanical performance of concrete pavement. *Road Materials and Pavement Design*. 2018. 21 (6). pp. 1726-1737. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1561379>.
9. Nobili A., Lanzoni L., Tarantino A.M. Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement. *Construction and Building Materials*. 2013. 47. pp. 888-895. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.077>.
10. Kroviakov S.O., Hedulian D.Iu., Kryzhanovskiy V.O., Zaboloka M.V., Yelkin A.V. Comparison of fiber concrete properties for industrial floors and road pavements with steel and polypropylene fiber. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2022. №87. С.76-84. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2022-87-76-84>.
11. Alsabbagh A., Wtaife S., Shaban A., Suksawang N., Alshammari E. Enhancement of rigid pavement capacity using synthetic discrete fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. 584. 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/584/1/012033>.
12. Santhosh J.C., Samal S.R., Ganesh V.N., Pavani D., Sridhar R.S. Experimental investigation on the effect of polypropylene fibers with respect to the fatigue behavior of rigid pavement. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. 207. pp. 383-395. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7509-6_31.
13. Kopecky L., Machovic V., Králík V., Bittnar Z., Andertová J., Šmilauer V., Lhotka M. Surface modification of pet fibers to improve mechanical properties of cement composites. *33rd International Conference on Cement Microscopy*, 2011, pp.355-371.
14. Kroviakov S., Kryzhanovskiy V., Zaboloka M. Steel fibrous concrete with high-early strength for rigid pavements repair. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1162. no. 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012008>.
15. Aruntaş H. Y., Cemalgil S., Şimşek O., Durmuş G., Erdal M. Effects of super plasticizer and curing conditions on properties of concrete with and without fiber. *Materials Letters*. 2008. 62 (19). pp. 3441-3443. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.02.064>.
16. Ahmad W., Farooq S.H., Usman M., Khan M., Ahmad A., Aslam F., Yousef R.A., Abduljabbar H.A., Sufian M. Effect of coconut fiber length and content on properties of high strength concrete. *Materials*. 2020. 13. 1075. <https://doi.org/10.3390/ma13051075>.
17. Jeff Wu C. F., Hamada M.S. *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization* (2d ed.), 2009, 760 p.
18. Moskalova K., Lyashenko T., Aniskin A. Modelling the relations of rheological characteristics with composition of plaster mortar. *Materials*. 2022. 15(1). 371. <https://doi.org/10.3390/ma15010371>.
19. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. *Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении*. Одесса: Астропринт, 2017. 168 с.
20. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. [Чинний від 2016-04-01]. Вид. офіц. Київ, 2015. 113 с.

References

- [1] K. Hall, D. Dawood, S. Vanikar and other, *Long-life Concrete Pavements in Europe and Canada*. Report No. FHWA-PL-07-027, American Trade Initiatives, 2007.
- [2] I. Hussain, B. Ali, T. Akhtar, M.S. Jameel, S.S. Raza, "Comparison of mechanical

- properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene)", *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00429, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>.
- [3] M. Jaral, E.S. Firdous, "A review study on the steel fiber reinforced concrete pavement", *International journal of scientific development and research*, 3 (4), pp. 311-313, 2018.
- [4] O.F. Hamim, S.S. Aninda, M.S. Hoque, "Hadiuzzaman M. Suitability of pavement type for developing countries from an economic perspective using life cycle cost analysis", *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14, pp. 259–266, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0107-z>.
- [5] M. Affan, M. Ali, "Experimental investigation on mechanical properties of jute fiber reinforced concrete under freeze-thaw conditions for pavement applications", *Construction and Building Materials*, 323, 126599, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126599>.
- [6] Ž. Kos, S. Kroviakov, V. Kryzhanovskiy, I. Grynyova, "Research of strength, frost resistance, abrasion resistance and shrinkage of steel fiber concrete for rigid highways and airfields pavement repair", *Applied Sciences*, 12 (3), 1174, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12031174>.
- [7] S. Kroviakov, A. Mishutin, L. Chintea, "Multi-criteria optimization of the fiber concretes compositions of rigid pavement", *Mechanics and mathematical methods*, 3 (1), pp. 62-71, 2021. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2021-3-1-62-71>.
- [8] A. Sarkar, M. Hajihosseini, "The effect of basalt fibre on the mechanical performance of concrete pavement", *Road Materials and Pavement Design*, 21 (6), pp. 1726-1737, 2018. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1561379>.
- [9] A. Nobili, L. Lanzoni, A.M. Tarantino, "Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement", *Construction and Building Materials*, 47, pp. 888-895, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.077>.
- [10] S.O. Kroviakov, D.Iu. Hedulian, V.O. Kryzhanovskiy, M.V. Zavoloka, A.V. Yelkin, "Comparison of fiber concrete properties for industrial floors and road pavements with steel and polypropylene fiber", *Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, no.87, pp.76-84, 2022. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2022-87-76-84>.
- [11] A. Alsabbagh, S. Wtaife, A. Shaban, N. Suksawang, E. Alshammari, "Enhancement of rigid pavement capacity using synthetic discrete fibers", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 584, 012033, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/584/1/012033>.
- [12] J.C. Santhosh, S.R. Samal, V.N. Ganesh, D. Pavani, R.S. Sridhar, "Experimental investigation on the effect of polypropylene fibers with respect to the fatigue behavior of rigid pavement", *Lecture Notes in Civil Engineering*, 207, pp. 383-395, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7509-6_31.
- [13] L. Kopecky, V. Machovic, V. Králík, Z. Bittnar, J. Andertová, V. Šmilauer, M. Lhotka, "Surface modification of pet fibers to improve mechanical properties of cement composites", *33rd International Conference on Cement Microscopy*, 2011, pp.355-371.
- [14] S. Kroviakov, V. Kryzhanovskiy, M. Zavoloka, "Steel fibrous concrete with high-early strength for rigid pavements repair", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1162, no. 012008, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012008>.
- [15] H.Y. Aruntaş, S. Cemalgil, O. Şimşek, G. Durmuş, M. Erdal, "Effects of super plasticizer and curing conditions on properties of concrete with and without fiber", *Materials Letters*, 62 (19), pp. 3441-3443, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.02.064>.
- [16] W. Ahmad, S.H. Farooq, M. Usman, M. Khan, A. Ahmad, F. Aslam, R.A. Yousef, H.A. Abduljabbar, M. Sufian, "Effect of coconut fiber length and content on properties of high strength concrete", *Materials*, 13, 1075, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13051075>.
- [17] C.F. Jeff Wu, M.S. Hamada, *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization* (2d ed.), 2009.
- [18] K. Moskalova, T. Lyashenko, A. Aniskin, "Modelling the relations of rheological

characteristics with composition of plaster mortar", *Materials*, 15(1), 371, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15010371>.

- [19] T.V. Lyashenko, V.A. Voznesenskiy, *Metodologiya retsepturno-tehnologicheskikh poley v komp'yuternom stroitel'nom materialovedenii*. Odessa: Astroprint, 2017.
- [20] DBN V.2.3-4:2015. Avtomobil'ni dorohy. Chastyna I. Proektuvannya. Chastyna II. Budivnytstvo. Kyiv, 2015.

THE INFLUENCE OF THE AMOUNT OF FIBER AND SUPERPLASTICIZER ON THE STRENGTH OF CONCRETE FOR THE RIGID PAVEMENTS

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

¹**Poltorapavlov A.O.**, andpolt90@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7044-4203

¹**Mishutin A.V.**, Doctor of Engineering, Professor, mishutin52@ukr.net, ORCID 0000-0001-9512-6084

¹**Zavoloka M.V.**, PhD, Professor, mvzavoloka@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2080-1230

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

Abstract. According to the optimal plan, an experiment was conducted in which the following factors of the concrete composition of rigid pavements were varied: the amount of Portland cement (from 350 to 450 kg/m³), the amount of polypropylene fiber with a fiber length of 39 mm and an equivalent diameter of 0.45 mm (from 0 to 3 kg/m³), the amount of superplasticizer based on polycarboxylates (from 1 to 2%). All concrete mixtures had equal mobility S1. Equal mobility was achieved by selecting the amount of water in the composition with appropriate adjustment of the concrete composition. It was established that with an increase in the amount of Portland cement in the concrete composition, the W/C of mixtures of equal mobility decrease. By increasing the amount of superplasticizer from 1 to 2% of the weight of cement, the W/C of the mixture decreases by 10-12%. When polypropylene fiber is introduced in the amount of up to 1.5 kg/m³, the W/C of the mixture practically does not change. But when the amount of fiber is increased to 2.5-3 kg/m³, the W/C of the mixture significantly increases.

The strength of concrete and fiber concrete was determined at the age of 3 and 28 days. It was established that at the age of 3 days, the compressive strength of the tested concretes is 63-69% of its strength at the design age. By increasing the amount of superplasticizer to 2%, the compressive strength increases by 4.5-6 MPa at the age of 3 days, and increases by 7-9 MPa at the age of 28 days. In the early and design age, when the amount of polypropylene fiber increases to 1.5-1.8 kg/m³, the compressive strength of concrete increases by an average of 3 MPa. A further increase in the amount of fiber already has a negative effect on the strength of concrete. At an early age, the influence of the amount of cement on the flexural strength of concrete is more noticeable than at the design age. Due to the increase in the amount of Portland cement from 350 to 450 kg/m³ at the age of 3 days, the flexural strength increases by an average of 1.4 MPa, and at the age of 28 days it increases by 0.5 MPa. Concretes with amount of superplasticizer 1.7-1.8% have the highest flexural strength. Thanks to the application of dispersed reinforcement, the tensile strength of the tested concretes increases by 0.3-0.5 MPa. When using a rational amount of additives and fiber, the flexural strength of the tested concretes is at least 6 MPa, which corresponds to the class B_{bb}4.8. According to the requirements of DBN B.2.3-4:2015, such concrete can be used for rigid pavements of any category.

Keywords: rigid pavement, modified fiber concrete, polypropylene fiber, superplasticizer, strength.

Стаття надійшла до редакції 9.12.2022

ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE OF CONCRETE FRACTURES IN STRUCTURES THAT WORK ON COMPRESSION AND ITS IMPACT ON STRENGTH¹**Sumaryuk O.V.**, Ph.D.,

o.sumariuk@chnu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3238-8647

¹**Sobko Yu.T.**, Ph.D.,

yu.sobko@chnu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6380-9227

¹*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University**Kotsyubinsky Street, Chernivtsi, Chernivtsi region, 58012*²**Chernenko K.V.**, Ph.D., Associate Professor

Chernenko.kv@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1616-5999

²*Kyiv National University of Construction and Architecture**Pivotroflotskyi prospect, Kyiv, 03037*

Abstract. Comparative microanalysis and elemental analysis of the structure of chips of concrete composites of different strength from compressive structures were used. Analysis of the microstructure of concrete chips was performed using a scanning electron microscope from Oxford SU 70 using a CCD detector. Elemental analysis of objects was performed using energy-dispersive X-wave spectroscopy (EDC analysis). The method of energy-dispersive X-wave spectroscopy is used. The character of opening of cracks of concrete samples in the course of their destruction is analyzed. From the data of X-ray and spectral analysis it follows that in a series of samples of strength of 120 MPa in the process of hydration of clinker minerals during hardening of concrete a number of chemically active substances is formed. These are primarily potassium oxide hydrate, calcium silicate hydrate (HSC) and structural gel models such as Janite and Tobermorite. Modification of the concrete composite with a complex of MK and MTK create conditions for the conversion of unstable and soluble calcium hydroxide into a strong crystalline hydrate of calcium silicate.

The structure of concrete compacted in this form gives a significant increase in strength. The influence of ultrafine modifiers on the microstructure of cement stone formed during the operation of the structure and the strength of concrete are determined. The results of the scanning electron microscopy analysis show that the phase sizes differ slightly, but are not larger than $\approx 20 \mu\text{m}$. Characteristic destruction of the sample with a strength of 120 MPa occurred in the main cracks, which develop due to the greater number of phases in contrast to the nature of the destruction of the sample with a strength of 50 MPa, which broke mainly on one structure. The complex of modifiers based on microsilica and metakaolin in the concrete mixture creates conditions for the conversion of unstable and soluble calcium hydroxide into a strong crystalline hydrate of calcium silicate. When using cement with a low content of C_3S less than $\approx 50\%$ significantly complicates the production of high-strength concretes, in particular when using silica and metakaolin, because the effectiveness of these additives implies the presence of excess portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the curing system, while systems with low C_3S content is characterized by a reduced content of $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Keywords: concrete, compressive structures, ultrafine modifiers, energy-dispersion x-wave analysis, scanning electron microscopy.

Introduction. The implementation of a complex of physicochemical methods for diagnosing the state of the structure of concrete composites in structures is an urgent task today. Since the new approach to the chemical modification of the commercial concrete mixture poses the problems of substantiating the cause-and-effect relationships of structure formation and quality control of the raw material, which is a necessary condition for obtaining high-strength concrete.

The development of ways to reduce structural defects and limit the deformable properties of concrete becomes an important task for both research and engineering practice. In particular, this is

relevant for high-strength concrete composites, for which the filling density at the micro- and nanostructural level is an important characteristic. Among the technological factors that affect the formation of a concrete matrix of high structural strength and density is the modification of the concrete composite with a complex of finely dispersed modifiers based on amorphous condensed silica with a specific surface area of $\approx 250 \text{ m}^2/\text{g}$ [1]. Highly active pozzolans lead to a decrease in porosity and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content, which, in turn, affects the generation of calcium hydrosilicates [2].

The paper analyzes data from scanning electron microscopy [3] of chips of concrete composites of different component composition and strength, which was determined experimentally. Energy dispersive X-wave spectroscopy was used to determine the elemental composition of the formed fracture phases.

Analysis of recent research and publications. The experience of international research [4-10] indicates that the structure of high-strength concrete is formed mainly from low-base calcium hydrosilicates (CSH-I) and such structural models of cement gel as Jenite and Tobermorite. However, there are a number of factors that can affect the physical and mechanical properties of concrete. First of all, these are microcracks caused by autogenous shrinkage [11-15], which significantly reduces the resistance of concrete to aggressive environments, and defects in the interphase transition zone between the cement matrix and large aggregate aggregates [16].

The purpose of the work is to substantiate the cause-and-effect relationships of the processes of concrete stone structure formation and their influence on strength indicators for physical and mechanical tests. For this purpose, two experimental recipes of concrete mixture from structures were selected.

Research materials and methods. To compare the structure, samples with a compressive strength of 50 MPa (sample #1) and 120 MPa (sample #2) were selected, which was modified with a complex of finely dispersed modifiers based on microsilica (MC) and metakaolin (MTK).

Analysis of the features of the microstructure of concrete chips was carried out using a scanning electron microscope of the Oxford SU 70 company using a CCD detector. Elemental analysis of objects was carried out using energy dispersive X-wave spectroscopy (EDX analysis).

A high vacuum (10^{-7} mBar) was created in the microscope chamber to eliminate the interaction of electrons with air molecules. To eliminate impurities and create a vacuum, the chamber was additionally equipped with a vessel cooled by liquid nitrogen, designed to condense impurities and cool the X-wave radiation spectrum analysis detector.

Physical and mechanical tests of concrete samples were carried out in accordance with current normative documents DBN B.2.7-64, DBN B.2.7-65, DBN B.2.7-69, DSTU B B.2.7-96, DSTU B B.2.7-114. The determination of compressive strength was carried out on a P250 hydraulic press, the loading of the samples was carried out continuously at a speed that ensures an increase in the calculated stress in the sample until its complete destruction within $(0.6 \pm 0.4) \text{ MPa/s}$.

Research results. The microstructure of the concrete composite plays a decisive role in the formation of the mechanical properties of the concrete composite. With high stress gradients that occur in reinforced concrete structures, thermal shocks, freezing of water, the homogeneity, dispersion and phase composition of the cement matrix affects the development and character of deformations.

From the scanning electron microscopy data in Fig. 1 and energy dispersive X-wave spectroscopy Fig. 2. the list and relative content of elements characterizing the phase composition of the fracture surface of sample No. 1 was determined. The list of elements in Table 1 and their percentage content indicates the presence in the concrete matrix of fractured calcite CaCO_3 , which was formed as a result of the reaction of calcium oxide with atmospheric carbon dioxide in the presence of moisture and has a spherical structure with low adhesion and cohesion to cement stone. High concentrations of calcite on the fracture surfaces are present due to the fact that the fracture of the concrete structure mainly occurs in areas of lower strength, in which such a phase is present, which is confirmed by EDH analysis data. From the results of EDH spectroscopy, it can be assumed that the greater the dispersion of the phase components of calcite, the higher the concentration of aluminum atoms and the lower the concentration of silicon atoms.

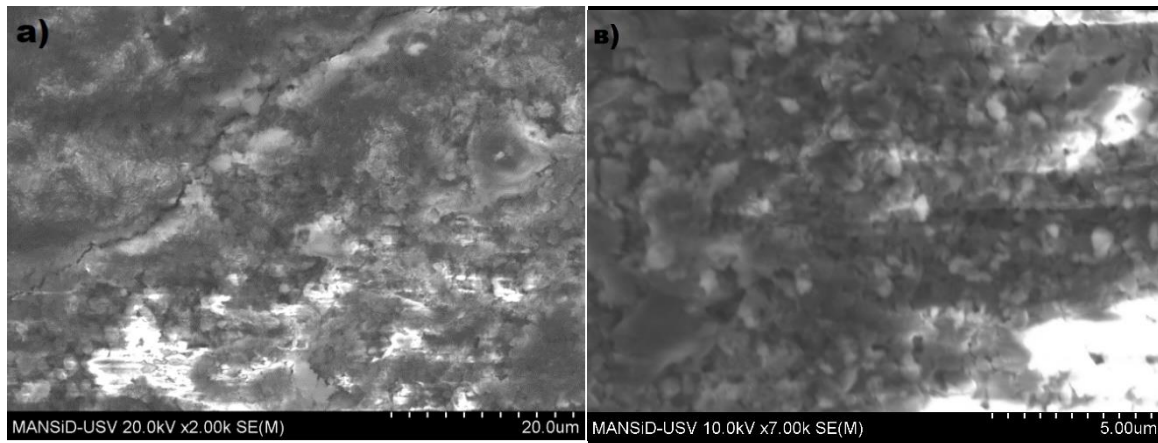


Fig. 1. Electronic raster images of the surface of concrete fractures from structures of sample No. 1 of various scales

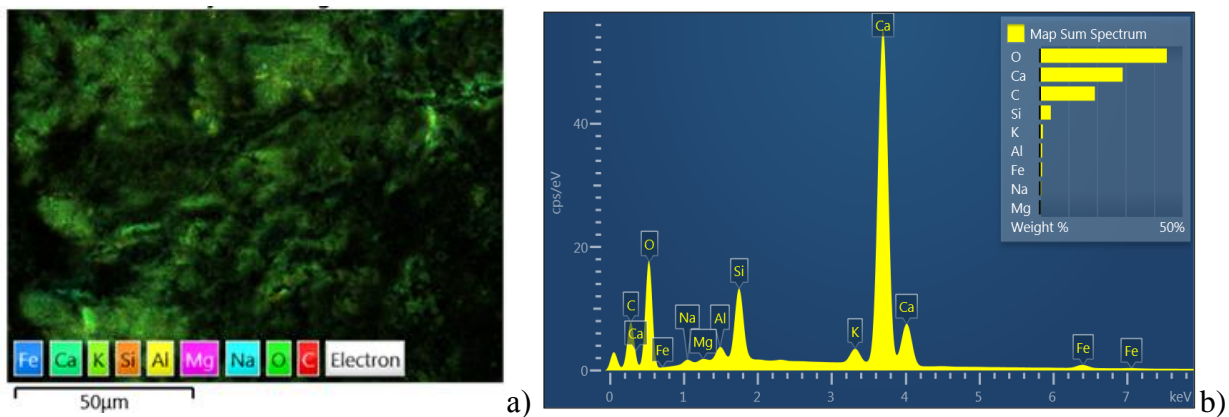


Fig. 2. Elemental map of concrete sample No. 1 according to the results of EDH analysis (a) and the results of energy dispersive X-wave analysis (b)

Table 1 – Elemental composition of broken concrete of sample No. 1

| Element | Apparent Concentration | Wt% | Standard Label |
|-----------|------------------------|--------------|--------------------------------|
| C | 108.28 | 19.27 | C |
| O | 285.15 | 44.50 | SiO ₂ |
| Na | 5.13 | 0.45 | Albite |
| Mg | 2.27 | 0.21 | MgO |
| Al | 10.60 | 0.82 | Al ₂ O ₃ |
| Si | 55.79 | 3.86 | SiO ₂ |
| K | 19.90 | 1.07 | KBr |
| Ca | 495.17 | 29.03 | Wollastonite |
| Fe | 10.54 | 0.79 | Fe |

In Fig. 3, 5 show fragments of raster electron microscopy images of sample #2. Elemental analysis in Table 2, which indicates the presence of mainly low- ($\text{CaO/SiO}_2 \approx 1.8$) and high-basic ($\text{CaO/SiO}_2 \approx 2.6$) phases of calcium hydrosilicates, as well as unreacted microsilica particles, in the concrete structure. Compared to sample No. 1, the structure of sample No. 2 is characterized by a greater number of phases and their heterogeneity. It can be assumed that this is what significantly increases the compressive strength for sample #2, which is associated with a higher specific surface area of pozzolan particles, which are able to react faster with Ca(OH)_2 , forming a denser microstructure.

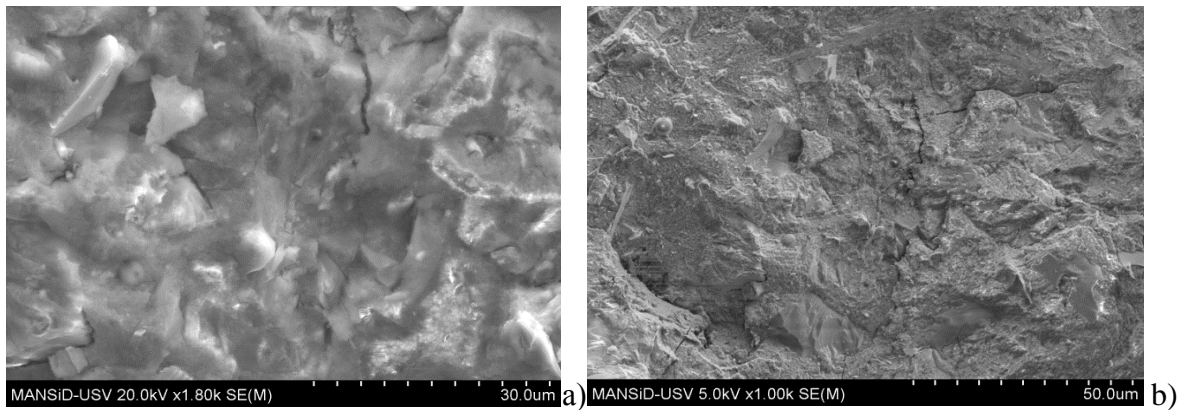


Fig. 3. Electronic raster images of the fracture surface of concrete from structures of sample No. 2 of various scales

The failure of the concrete sample under a pressure of 120 MPa occurred with the formation of fractures with a predominant amount of calcium hydroxides, which are denser and stronger than the structure prevailing in the fractures of samples No. 1, in which the fracture occurred through calcite with a Mohs hardness of 3. All phases of hydration in the second sample is more evenly distributed, unlike the first. From the results of the analysis of scanning electron microscopy, it follows that the sizes of the phases differ slightly, but are not larger than $\approx 20 \mu\text{m}$. The characteristic failure of sample No. 2 occurred along the main cracks, which develop due to a greater number of phases, in contrast to the nature of the failure of sample No. 1, the failure of which occurred mainly along one structure.

From the X-ray and spectral analysis data shown in Fig. 4, it follows that in a series of samples with a strength of 120 MPa, a number of chemically active substances are formed in the process of hydration of clinker minerals during concrete hardening. These are primarily potassium oxide hydrate, calcium silicate hydrate (GSK) and such structural gel models as Jenite and Tobermorite. Modification of the concrete composite with the MK and MTK complex creates conditions for the transformation of unstable and soluble calcium hydroxide into strong crystalline calcium silicate hydrate. The structure of concrete compacted in this way gives a significant increase in the strength index.

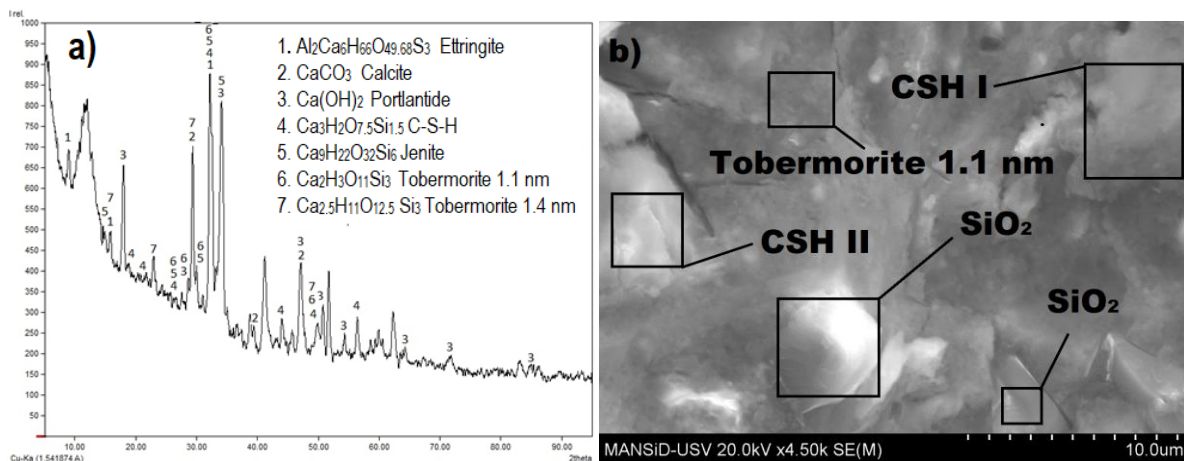


Fig. 4. X-ray analysis of concrete (a), and SEM image of the microstructure of a section of the concrete surface of sample #2 (b)

In addition, when MK is introduced into the liquid phase of the cement dough, a silicon oxide gel is formed, which subsequently adsorbs free Ca^{2+} and OH^- ions with the formation of weakly crystallized low-basic HSCs. Under limited conditions, low-base HSCs lead to an increase in the number of gel pores and a decrease in open porosity. Such closed pores prevent the propagation of cracks in the depth of the solid body, because the stress drops very quickly from high values on the surface of the pore to low values in its inner parts, that is, small closed pores prevent the process of material destruction.

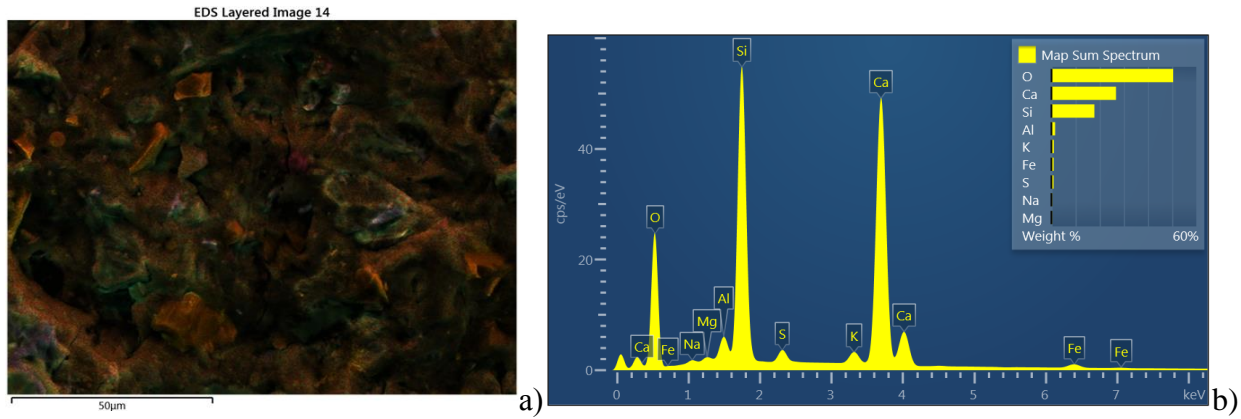


Fig. 5. Elemental map of the concrete sample of formulation No. 2 according to the results of EDH analysis (a) and the results of energy dispersive X-wave analysis (b)

Table 2 – Elemental composition of fracture of the concrete sample of formula #1

| Element | Apparent Concentration | Wt% | Standard Label |
|-----------|------------------------|--------------|--------------------------------|
| O | 393.92 | 50.40 | SiO₂ |
| Na | 3.87 | 0.34 | Albite |
| Mg | 3.43 | 0.31 | MgO |
| Al | 19.98 | 1.52 | Al ₂ O ₃ |
| Si | 257.48 | 17.81 | SiO₂ |
| S | 12.53 | 0.90 | FeS ₂ |
| K | 17.78 | 1.03 | KBr |
| Ca | 439.97 | 26.75 | Wollastonite |
| Fe | 12.70 | 0.94 | Fe |

Conclusions: a complex of modifiers based on microsilica and metakaolin in the concrete mixture create conditions for the transformation of unstable and soluble calcium hydroxide into strong crystalline calcium silicate hydrate. The concrete structure compacted in this way increases the strength and durability of reinforced concrete structures. In addition, when MK is introduced into the liquid phase of the cement dough, a silicon oxide gel is formed, which subsequently adsorbs free Ca²⁺ and OH ions with the formation of weakly crystallized low-basic HSCs. Structural models of cement gel, such as Tobermorite and Jenite, are essentially a complex nanomaterial consisting of many separate layers of molecules with different properties, which are formed into a kind of structural composite. Determination of the physical and mechanical properties of these structures requires a more in-depth study using already existing diagnostic methods.

It should also be noted that the use of cement with a low C₃S content of less than ≈50% significantly complicates the production of high-strength concrete, in particular when using silica and metakaolin, since the effectiveness of the use of these additives requires the presence of excess portlandite Ca(OH)₂ in the hardening system, while how systems with a low content of C₃S are characterized by a reduced content of Ca(OH)₂.

Reference

[1] L. Martinez, J. F. M. Hernandez, B. Middendorf, M. Gehrke, R.L. Day, "Lime-pozzolan binder as a very fine mineral admixture in concrete", presented at the International Symposium on ultra high performance concrete, Kassel, Germany, 2004, pp. 117–131.

- [2] V.V. Belov, M.A. Smyrnov, A.N. Lebedev, "Optymyzatsiya hranulometrycheskoho sostava kompozytsyi dlia yzghotovleniia bezobzhyhovykh stroytelnykh konhlomeratov", *Vestnyk Tsentralnogo rehyonalnogo otdeleniia RAASN*, no. 9, pp. 65–72, 2010.
- [3] S.A. Udodov and V.F. Chernikh, "Prymenenye porystoho zapolnytelia v otdelochnykh sostavakh dlia yacheystoho stroytelnoho kompozyta", *Sukhye stroytelnie smesy*, vol. 1, no. 2, pp. 68–70, 2008.
- [4] O.V. Sumariuk, V.F. Romankevich, I.M. Fodchuk, "Prospects of Fabrication of Ultrahigh-Performance Concrete Composites by means of Introduction of Polyfunctional Nanomodifiers", *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, vol. 16, no. 1, pp. 103–115, 2018. doi: <https://doi.org/10.15407/nnn.16.01.103>.
- [5] M. Schmidt, R. Krelaus, T. Teichmann, T. Leutbecher, E. Fehling, "Fügen von Bauteilen aus UHPC durch Kleben. Voruntersuchungen und Anwendung bei der Gärtnerplatzbrücke in Kasse", *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 102, no. 10, pp. 681–690, 2007. doi: [10.1002/best.200700576](https://doi.org/10.1002/best.200700576).
- [6] H. Li, H. Xiao, J. Yuan, J. Ou, "Microstructure of cement mortar with nano-particles", *Composites Part B: Engineering*, vol. 35, no. 2, pp. 185–189, 2004. doi: [10.1016/S1359-8368\(03\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00052-0).
- [7] T. Ji, "Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂", *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 10, pp. 1943–1947, 2005. doi: [10.1016/j.cemconres.2005.07.004](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.004).
- [8] M. Cheyrezy, V. Maret, L. Frouin, "Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete)", *Cement and Concrete Research*, vol. 25, no. 7, pp. 1491–1500, 1995. doi: [10.1016/0008-8846\(95\)00143-Z](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00143-Z).
- [9] M. Stechyshyn, M. Sanyts'kyy, O. Poznyak, "Durability properties of high volume fly ash self-compacting fiber reinforced concretes", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 11(75), Art. no. 11(75), 2015. doi: [10.15587/1729-4061.2015.44246](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.44246).
- [10] X. He and X. Shi, "Chloride Permeability and Microstructure of Portland Cement Mortars Incorporating Nanomaterials", *Transportation Research Record*, vol. 2070, no. 1, pp. 13–21, 2008. doi: [10.3141/2070-03](https://doi.org/10.3141/2070-03).
- [11] O.V. Sumariuk, V.F. Romankevich, Yu.T. Roman, I.M. Fodchuk, V.M. Tkach, "Concrete Composites of High Structural Strength and Density Modified by a Complex of Fine-Dispersed Additives Based on Nanosilica and Metakaolin", *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, vol. 16, no. 1, pp. 117–128, 2018. doi: <https://doi.org/10.15407/nnn.16.01.117>.
- [12] M.P. Gorsky, P.P. Maksimyak, A.P. Maksimyak, "Laser-radiation scattering by cement in the process of hydration: simulation of the dynamics and experiment", *Appl. Opt., AO*, vol. 51, no. 10, pp. 208–214, 2012. doi: [10.1364/AO.51.00C208](https://doi.org/10.1364/AO.51.00C208).
- [13] Y. Qing, Z. Zenan, K. Deyu, C. Rongshen, "Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume", *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 3, pp. 539–545, 2007. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2005.09.001](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.09.001).
- [14] E. Sakai, K. Yamada, A. Ohta, "Molecular Structure and Dispersion-Adsorption Mechanisms of Comb-Type Superplasticizers Used in Japan", *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 16–25, 2003. doi: [10.3151/jact.1.16](https://doi.org/10.3151/jact.1.16).
- [15] E.N. Kislovskii *et al.*, "Combined multiparametric X-ray diffraction diagnostics of microdefects in silicon crystals after irradiation by high-energy electrons", *J. Surf. Investig.*, vol. 7, no. 3, pp. 523–530, 2013. doi: [10.1134/S1027451013030270](https://doi.org/10.1134/S1027451013030270).
- [16] J. Karthikeyan and S. C. Natesan, "Role of Silica fume Concrete in Concrete Technology", presented at the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2004, pp. 153–158.

**АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРИ ЗЛАМІВ БЕТОНУ В КОНСТРУКЦІЯХ,
ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ НА СТИСК ТА ЇЇ ВПЛИВ НА МІЦНІСТЬ**

¹Сумарюк О.В., канд. фіз.-мат. наук,
o.sumariuk@chnu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3238-8647

¹Собко Ю.Т., к.т.н.,
yu.sobko@chnu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6380-9227

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
вулиця Коцюбинського, 2, Чернівці, Чернівецька область, 58012

²Черненко К.В., к.т.н., доцент,
Chernenko.kv@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1616-5999

²Київський національний університет будівництва та архітектури
Повітрофлотський проспект, Київ, 03037

Анотація. Проведено порівняльний мікроаналіз та елементний аналіз структури сколів бетонних композитів різної міцності з конструкцій, які працюють на стиск. Для порівняння структури вибрано зразки із міцністю на стиск 50 МПа, та 120 МПа який модифіковано комплексом дрібнодисперсних модифікаторів на основі мікрокремнезему (МК) та метакаоліну (МТК). Аналіз особливостей мікроструктури сколів бетону проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопа фірми Oxford SU 70 з використанням CCD-детектора. Елементний аналіз об'єктів проводився за допомогою енергодисперсійної X-хвильової спектроскопії (ЕДХ-аналізу). Використано метод енергодисперсійної X-хвильової спектроскопії. Проаналізовано характер розкриття тріщин бетонних зразків в процесі їх руйнування. З даних X-променевого та спектрального аналізу слідує, що в серії зразків міцності 120 МПа в процесі гідратації клінкерних мінералів при твердінні бетону утворюється ряд хімічно активних речовин. Це в першу чергу – гідрат калію окису, гідрат силікату кальцію (ГСК) та такі структурні моделі гелю, як Дженіт і Тоберморіт. Модифікування бетонного композиту комплексом МК і МТК створюють умови для перетворення нестабільного і розчинного гідроксиду кальцію в міцний кристалічний гідрат силікату кальцію.

Ущільнена в цьому вигляді структура бетону дає значний приріст показника міцності. Визначено вплив ультрадисперсних модифікаторів на утворену в процесі експлуатації конструкції мікроструктуру цементного каменю та міцність бетону. З результатів аналізу скануючої електронної мікроскопії слідує, що розміри фаз дещо відрізняються, але не є більшими ніж ≈ 20 мкм. Характерне руйнування зразка з міцністю 120 МПа відбулося по магістральним тріщинам, які розвиваються через більшу кількість фаз на відміну від характеру руйнувань зразка з міцністю 50 МПа, злам якого відбувся переважно по одній структурі. Комплекс модифікаторів на основі мікрокремнезему та метакаоліну в бетонній суміші створюють умови для перетворення нестабільного та розчинного гідроксиду кальцію в міцний кристалічний гідрат силікату кальцію. При використанні цементу з низьким вмістом C_3S меншим за $\approx 50\%$ значно ускладнює одержання високоміцних бетонів, зокрема при використанні кремнезему і метакаоліну, оскільки ефективність застосування цих добавок передбачає наявність в тверднучій системі надлишкового портландиту $Ca(OH)_2$, в той час як системи з низьким вмістом C_3S характеризуються зниженим вмістом $Ca(OH)_2$.

Ключові слова: бетон, конструкції які працюють на стиск, ультрадисперсні модифікатори, енергодисперсійний x-хвильовий аналіз, скануюча електронна мікроскопія.

Стаття надійшла до редакції 25.11.2022

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАЧІ ТЕПЛА ДО ТКАНИНИ ЧЕРЕЗ ІНТУМЕСЦЕНТНЕ ПОКРИТТЯ

^{1,2}**Цапко Ю.В.**, д.т.н., професор,
juryts@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0625-0783

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

^{1,3}**Цапко О.Ю.**, к.т.н., с.н.с.,
alekseytsapko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2298-068X

¹**Нерода В.П.**, магістр,
v.nerodaa@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5139-866X

¹*Науково-дослідний інститут в'яжучих речовин і матеріалів ім. В.Д. Глуховського
Київський національний університет будівництва та архітектури
пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03037, Україна*

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

³*Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс"
вул. Казимира Малевича, 84, м. Київ, 03150, Україна*

Анотація. Проблема застосування виробів з тканин для будівельних конструкцій із зберігання та транспортування вибухових речовин полягає в забезпеченні їх стійкості до дії вогню та довговічності при експлуатації, але необхідно враховувати зміну їх вогнезахисних властивостей. Зниження горючості і розроблення важкогорючих та важкозаймистих матеріалів є одним із основних напрямків попередження виникнення пожеж та вирішення проблеми розширення області застосування цих матеріалів. Оброблення засобами вогнезахисту суттєво впливає на поширення полум'я, дозволяє набагато зменшити димоутворювальну здатність та тепловиділення. Тому об'єктом досліджень була парусинова тканина, яка була вогнезахиснена інтумесцентним покриттям. Проведено моделювання та отримані залежності, що дозволяють розрахувати значення теплового потоку на межі «шар пінококсу – тканина» залежно від дії температури. Доведено, що в процесі термічного впливу на тканину проходить процес перенесення високої температури та її загорання. На основі одержаних результатів натурних випробувань з визначення процесу передавання високої температури полум'я через покриття встановлено, що при дії полум'я на необроблені модельні зразки елементів намету, виготовлених з парусинової тканини, відбувається її займання на 45 с та поширення полум'я поверхнею, що призводить до повного згорання протягом 108 с. Характер вигорання для модельного зразка елементів намету, який оброблений вогнезахисним інтумесцентним покриттям, показав відсутність поширення полум'я після вигорання вогнища та зафіксовано спучення захисного покриття, що сягало 7...8 мм. Практична цінність отриманих результатів при визначенні властивостей парусинової тканини, вогнезахисненої інтумесцентним покриттям, дозволяє встановити умови експлуатації виробів і будівельних конструкцій на її основі.

Ключові слова: вогнезахист тканини, спучуючі покриття, тепловий потік, оброблення поверхні, теплофізичні властивості.

Вступ. Зберігання та транспортування вибухових речовин тісно пов'язане з застосуванням найрізноманітніших будівельних та пакувальних виробів, які виготовляються у тому числі з текстильних матеріалів [1-2]. Процес займання та поширення горіння при цьому носить прогресуючий характер, оскільки дані матеріали легкозаймисті і швидко поширюють полум'я, а методів ліквідації пожежі вкрай недостатньо. Все це призводить до активного горіння та послідуочого вибуху і розповсюдження новітніх осередків.

Статистика пожеж у Збройних Силах України свідчить про необхідність формування ефективної системи забезпечення вибухопожежобезпеки військових об'єктів, особливо місць зберігання запасів боєприпасів. Також важливим є приведення її до стану, спроможного забезпечити надійний захист особового складу та об'єктів Збройних Сил України від пожеж і вибухів. Велике значення для покращення стану вибухопожежобезпеки, запобігання і своєчасного реагування на такі події є проведення заходів по охороні військових об'єктів. Для цього об'єкти, крім обладнання спеціальними системами технічних засобів охорони, системами раннього виявлення надзвичайних ситуацій та оповіщення, мотивуються проведенням заходів профілактичного спрямування, зокрема вогнезахисне оброблення горючих матеріалів ефективними покриттями.

Тому дослідження, що направлені на визначення закономірностей передачі теплового потоку до тканини через інтумесцентне покриття, впливу покриттів на цей процес є невирішеною складовою забезпечення пожежобезпеки. А також визначають необхідність розроблення та використання спеціальних захисних засобів. Що і обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботі [3] обговорюється широкий діапазон високоефективних волокон, доступних для вогнестійкого кінцевого використання. Також представлено типи вогнестійких покриттів та обробок. Особливо актуальними є технології, що розвиваються для надання термо- та вогнестійкості і вони включають використання інтумесцентних методів обробки та потенційну корисність нанотехнологій, яким протягом останніх 10 років приділялося багато уваги на дослідницькому рівні. Термо- та вогнестійкі текстильні вироби можуть відповідати вимогам за вогнестійкістю, і при цьому зберегти свої спеціальні характеристики, що обумовлює їх застосування, у тому числі і для військових цілей. Але не наведені відповідні фізико-хімічні дані щодо зміни їх властивостей в процесі експлуатації.

В роботі [4] наведено результати експериментальних досліджень щодо моделювання ефективності вогнезахисту легко зведених конструкцій з текстильних займистих виробів. Проведеними дослідженнями з визначення пожежонебезпечних властивостей текстильних матеріалів встановлено загорання необробленого зразка, натомість для вогнезахищеного – процес займання та поширення полум'я не відбувся. Гальмування процесу займання та поширення полум'я для такого зразка пов'язане з розкладом антипіренів під дією температури з поглинанням тепла та виділенням негорючих газів (азот, діоксин вуглецю), зміною напрямлення розкладу в сторону утворення негорючих газів і важкогорючого коксового залишку. Проте, не досліджено закономірності процесу передачі тепла до тканини через захисне покриття.

В роботі [5] показано можливість отримання екологічно чистих, ефективних, вогнестійких бавовняних тканин. Оброблені бавовняні тканини (СОТР) показали чудову термічну стабільність і вогнестійкість з граничним кисневим індексом (LOI), який становив 42,5%. Порівняно з іншими вогнетривкими бавовняними тканинами, СОТР продемонстрував надзвичайну стійкість до прання, LOI залишався на рівні 28,3% після 50 циклів прання. Випробування на вертикальне горіння та конусна калориметрія продемонстрували самозатухання та значно покращили вогнестійкість СОТР. Пікова швидкість тепловиділення та загальне тепловиділення СОТР помітно знизилися на 65,5 та 71,4% відповідно. Крім того, було виявлено нижче утворення та виділення диму зі зменшенням загального утворення диму на 12,5% і загальної кількості диму на 18,8%, порівняно з необробленою бавовняною тканиною. Було припущено, що підвищена вогнестійкість СОТР каталізує дегідратацію та карбонізацію целюлози, сприяючи утворенню залишкового вугілля, зменшує виділення горючих газів і тепло/масообмін. Однак, не вказано, як витримують дані композиції зміну температурно-вологісних умов.

В роботі [6] досліджувалися теплоізоляційні властивості необроблених і оброблених тришарових трикотажних тканин різної товщини (2 мм, 3 мм і 4 мм) за допомогою кремнеземних аерогелів. Три зразки спейсерних тканин (300GSM, 350GSM, 540GSM) були покриті нанопористим силікагелем при температурі 26°C, а потім витримані для старіння,

заміни розчинника, модифікації поверхні. Досліджено такі характеристики, як термостійкість, теплопровідність, кут розташування ниток, пористість, повітропроникність зразків прокладочної тканини. Аналіз за допомогою скануючої електронної мікроскопії та інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є були проведені для дослідження морфології та зміни поверхні, ініційованої кремнеземним покриттям. Експериментальні результати показали, що оброблені уточні трикотаажні розділові тканини з 350GSM мають вищий термічний опір ($0,09131 \text{ м}^2 \cdot \text{кВт}^{-1}$), вищий коефіцієнт пористості, вищу повітропроникність, більший кут розташування та меншу щільність.

В роботі [7] представлено результати досліджень, проведених з метою отримання деяких екологічно чистих матеріалів для теплозахисту та ізоляції, призначених для використання у виробництві герметичних упаковок, мембран, рукавів, захисних футлярів і штор, засобів захисту від високих температур та пожежної небезпеки. Такі матеріали, виготовлені з вогнетривкої текстильної основи та покривного полімерного матеріалу. Текстильною основою була вогнетривка тканина різної фактури та товщини, отримана з термостійких акрилових волокон. Термостійкі еластомерні сполуки, такі як хлоропрен, змішаний з сажею HAF і хлоридом сурми, використовувалися як покривні матеріали. Екологічно чисті водні нанодисперсії для покриття вогнетривких текстильних виробів були отримані за рахунок покращення адгезії поліхлоропрену шляхом хімічного щеплення поліхлоропренового латексу Dispercoll C 84 з метилметакрилатом у присутності пероксиду бензоїлу як ініціатора. Отримані безазбестові матеріали термо-, хімічностійкі, пожежобезпечні. Однак, не показано вплив зміни середовища на покриття, процес його руйнування з часом.

В роботі [8] показано використання смоли на основі меламіну, яка широко використовуються в тканинах для підвищення вогне- і теплостійкості. Проте, модельовані експерименти з пранням припускають, що за один раунд прання водою 76...90 % меламіну було видалено з одягу. А тому постає задача зафіксувати антипірен у матеріалі.

В роботі [9] відображено розкладання вогнестійких матеріалів через підвищену температуру або контакт з полум'ям, що призводить до появи ряду хімічних сполук, деякі з яких можуть бути досить токсичними для людини. Проводились невеликі або стендові випробування продуктів розкладання, але завжди виникали питання щодо того, чи були іспити репрезентативними для повномасштабних результатів випробувань на спалах. Щоб визначити, чи достатньо для вимірювання продуктів розкладу та чи будуть різні вогнестійкі матеріали утворювати «фірмовий» набір сполук, було проведено повномасштабне тестування. Однак, механізм спучення покриття при цьому не вказаний та не виявлені умови експлуатації покриття.

В роботі [10] неткані матеріали були виготовлені з використанням вогнезахисних поліефірних (ПЕТ) порожнистих волокон (волокна FR-PET) та волокон ПЕТ з низькою температурою плавлення (волокна з низьким вмістом ТМ) для використання в якості теплоізоляції. Чотири неткані матеріали з різними технологічними шляхами були використані для виробництва сипучих нетканних матеріалів (LNF), термопресованих нетканних матеріалів (PNF), голкопробивних та термічнопресованих нетканних матеріалів (NPNF), а також голкопробивних та повітронепроникних нетканних матеріалів (NTNF). Оцінювали теплопровідність цих чотирьох нетканних матеріалів. Крім того, були створені LNF з використанням різних температур термічного пресування (100, 120, 140, 160, 180 та 200 °C), вмісту волокна з низьким вмістом ТМ (10, 20, 30, 40 та 50%) та кількості шарів нетканних матеріалів (1, 2, 3, 4 і 5 шарів) для оцінки міцності на розрив, теплопровідності та обмежувального показника кисню (LOI). Експериментальні результати показують, що LNF мали низьку теплопровідність – $0,5962 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, а LOI становив 35%.

Робота [11] присвячена визначенню теплопровідності рідкофазних матеріалів зі зміною фази (PCM) поблизу точки плавлення шляхом вивчення процесу еволюції поверхні розділу «тверда речовина-рідина». Було запропоновано теоретичну модель, яка дозволяє визначати теплопровідність за характеристики зміщення поверхні розділу під час процесу плавлення. Експерименти проводилися з використанням добре розробленої системи тестування для двох видів неорганічних PCM і експериментальні результати узгоджувалися з літературними

значеннями в діапазоні $\pm 6\%$. Джерела похибки вимірювань досліджувалися за часовими характеристиками зміни результатів експерименту. Виявлено, що неідеальні граничні умови тестової системи та початок природної конвекції були основними причинами похибки вимірювання. Щоб підвищити точність експериментальних результатів були використані чисельні методи для моделювання процесу плавлення в експериментах. Калібровані значення теплопровідності були отримані ітераційно з порівняння кривих руху межі розділу між експериментами та моделюванням, а розбіжності між каліброваними результатами та еталонними значеннями були обмежені до $\pm 3\%$.

Таким чином, з літературних джерел встановлено, що вогнезахисні покриття здатні захищати поверхню текстильного матеріалу від впливу вогню при експлуатації, але потребують значної кількості захисної речовини та здатні до підвищення жорсткості тканин. Крім того, не визначені параметри, які забезпечують стійкість до втрати вогнезахисних властивостей. Недосконалість математичних моделей для пояснення і опису процесу передавання тепла, нехтування застосуванням речовин для утворення теплоізолювального шару призводить до неефективного застосування засобів захисту. Тому необхідність встановлення параметрів стійкості тканин до високої температури і впливу покриттів на цей процес обумовило проведення досліджень у даному напрямку.

Мета дослідження. Метою даної роботи є визначення характеру процесу передачі теплового потоку до тканини від дії високотемпературного полум'я пальника при захисті інтумесцентним покриттям.

Матеріали і методи досліджень. Для дослідження передачі теплового потоку використовували зразки парусинової тканини необроблені [12] (рис. 1) та оброблені модифікованим спучуючим покриттям «Firewall-Wood» виробництва України у кількості 260 г/м^2 .



а)



б)

Рис. 1. Модельний зразок тканини:
а – до оброблення; б – після оброблення

Для виготовлення модельних зразків елементів намету, використовували парусинову тканину (рис. 2):

- необроблений (експериментальний зразок №1);
- оброблений модифікованим спучуючим покриттям «Firewall-Wood» (експериментальний зразок №2).

У якості пального для визначення ефективності вогнезахисту зразків елементів намету було використано рідку запалювальну суміш (бензин).

Результати досліджень. Для встановлення передачі теплового потоку до вогнезахисної тканини використовували метод вирішення задачі теплопровідності для двохскладової стінки, яка має різні теплофізичні властивості (рис. 3).



Рис. 2. Модельні зразки елементів намету, виготовлених з парусинової тканини:
а – необроблений; б – оброблений вогнезахисним інтумесцентним покриттям

В початковий момент часу покриття тканини миттєво нагрівається до температури T_{max} , яка підтримується постійною протягом всього часу нагрівання. При цьому покриття спучується та утворює шар пінококсу [13]. Розподілення температури проходить через шар пінококсу до досягнення критичної температури тканини на межі покриття і тканини T_s .

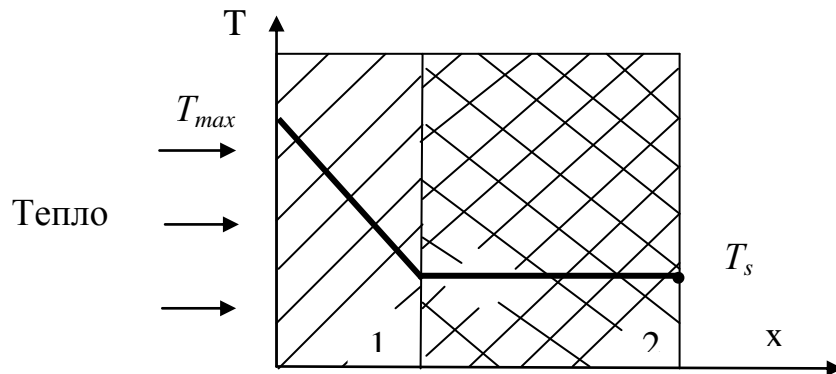


Рис. 3. Схема процесу передавання тепла:
1 – шар пінококсу; 2 – тканина

Диференціальні рівняння переносу тепла на межі двох пластин «шар пінококсу – тканина» мають наступний вигляд [14]:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - a_1 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) T = 0, \quad (-\infty < x < 0), \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - a_2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) T = 0, \quad (-\infty < x < 0; 0 < t < \infty), \quad (2)$$

з початковими та граничними умовами:

$$T|_{x=-\infty} = T_0, \quad T|_{x=\infty} = 0, \quad T|_{x=-0} = T|_{x=+0}, \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=-0} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=+0}, \quad (4)$$

$$T|_{t=0} = \begin{cases} T_0 & x < 0 \\ 0 & x > 0 \end{cases}, \quad (5)$$

$$T_0, a_1, a_2, \lambda_1, \lambda_2 = const, \quad (6)$$

де a_1, a_2 – коефіцієнт теплопровідності шару пінококсу та тканини, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;
 λ_1, λ_2 – коефіцієнт теплопровідності шару пінококсу та тканини, $\text{Вт/м} \cdot \text{К}^{-1}$;
 T – температура, $^{\circ}\text{C}$,
 x – координата, м.

Доцільним є визначення значення температури на межі «шар пінококсу – тканина» (T_s) і теплового потоку між даними областями [15]:

$$Q_m = \lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=+0}. \quad (7)$$

Робимо підстановку з врахуванням початкової умова для лівої напівплощини, яка не дорівнює нулю ($x < 0$):

$$T = T_0 - T_s, \quad (8)$$

де T_0 – максимальна температура на межі «шар пінококсу – тканина».

З урахуванням вищенаведеного задача з визначення температури T_s буде мати наступний вид:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - a_1 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) T_s = 0, \quad (-\infty < x < 0; 0 < t < \infty), \quad (9)$$

з наступними умовами:

$$T_s \Big|_{x=-\infty} = 0, \quad T_s \Big|_{t=\infty} = 0. \quad (10)$$

З урахуванням перетворення Лапласа для області $x < 0$ можемо записати зв'язок температури і теплового потоку у наступному виді [16]:

$$\left(P^{1/2} - \sqrt{a_1} \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot T_s \Big|_{x=0} = 0, \quad (11)$$

де P – оператор Лапласа.

З урахуванням початкової змінної температури T отримуємо:

$$P^{1/2} (T_0 - T_s) = \frac{T_0}{\sqrt{\pi \cdot t}} - P^{1/2} \cdot T_s = -\sqrt{a_1} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}. \quad (12)$$

Тоді для області $x > 0$ маємо значення у виді:

$$P^{1/2} T_s = -\sqrt{a_2} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=+0}. \quad (13)$$

З (12) і (13) з урахуванням умов рівності потоків (4), отримуємо:

$$P^{1/2} T_s = \frac{\sqrt{a_1}}{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2}} \frac{T_0}{\sqrt{\pi \cdot t}}. \quad (14)$$

Тоді значення температури на межі стінки з врахуванням перетворення Лапласа можемо записати у наступному виді:

$$T_s = \frac{\sqrt{a_1}}{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2}} \cdot T_0. \quad (15)$$

З урахуванням (7) тепловий потік через межу «шар пінококсу – тканина» за максимальної температури можемо записати у виді:

$$Q_s = \frac{\sqrt{a_1 a_2}}{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2}} \frac{\lambda_2}{a_2} \frac{T_0}{\sqrt{\pi \cdot t}}. \quad (16)$$

Відповідно густина теплового потоку від високої температури можна виразити рівнянням:

$$q_s = \frac{Q_s}{s^2}, \quad (17)$$

де s^2 – площа температурного впливу горючої речовини, m^2 .

Таким чином, проведено моделювання та отримані залежності, що дозволяють розрахувати значення теплового потоку на межі «шар пінококсу – тканина» залежно від дії температури.

Результати досліджень, з визначення динаміки температури на оберненій поверхні вогнезахищеної тканини, показали, що зразок необробленої тканини не витримав температурний вплив, при дії пальника відбувалось займання тканини, яке продовжувалося понад 110 с. При дії полум'я на зразок вогнезахищеної тканини температура на оберненій поверхні не перевищила 150 °С, займання тканини не відбулося.

З урахуванням літературних даних встановлено теплофізичні характеристики для тканини та пінококсу та представлено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Теплофізичні характеристики матеріалів

| Матеріал | Показник | | |
|---------------|----------------|--|--|
| | Товщина, мм | Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К) | Коефіцієнт температуропровідності, м/с ² |
| Тканина | 1,0 | 0,078 | 16·10 ⁻⁶ |
| Шар пінококсу | 7,5 | 0,034 | 8,9·10 ⁻⁶ |

Дані таблиці 1 показують дещо різні теплофізичні характеристики матеріалів, звідки випливає, що і теплова дія на тканину буде різною. Тепловий потік полум'я газового пальника становила близько 100 кВт/м², а температура полум'я газового пальника становила близько 1000 °С.

Також розраховано густина теплового потоку залежно від часу впливу на тканину полум'я пальника. Показано, що з наростанням температури густина теплового потоку на необроблену тканину збільшується до значення понад 60 кВт/м², чого достатньо для її займання (мінімальне значення густини теплового потоку становить близько 12,0 кВт/м²), а потім поступово підвищується у зв'язку з горінням матеріалу. Натомість, густина теплового потоку через інтумесцентне покриття на початку термічної дії становила понад 20 кВт/м², а потім наступив процес утворення теплоізолювального шару пінококсу і значення густини теплового потоку не перевищило 8,2 кВт/м², що недостатньо для її займання.

В ході подальших досліджень проведено натурні випробування з визначення процесу передавання високої температури полум'я через покриття.

На рис. 4 показано результати випробувань необробленого зразка елементів намету, виготовлених з парусинової тканини, а на рис. 5 – зразка елементів намету, виготовлених з парусинової тканини, обробленого вогнезахисним інтумесцентним покриттям. В таблиці 2 наведено результати втрати маси та час горіння модельного вогнища.

В результаті проведених випробувань встановлено, що при дії полум'я на необроблені зразки елементів намету, відбувається займання на 44...46 с та поширення полум'я, що призводить до повного згорання протягом 108...110 с. Натомість модельний зразок елементів намету, оброблений вогнезахисним інтумесцентним покриттям, при вигоранні модельного вогнища не загорівся, поширення полум'я не відбулося. При цьому зафіксовано спучення захисного покриття, що становило 7...8 мм та відбулося обвуглення поверхні на площі близько 500 мм² оберненої сторони тканини.

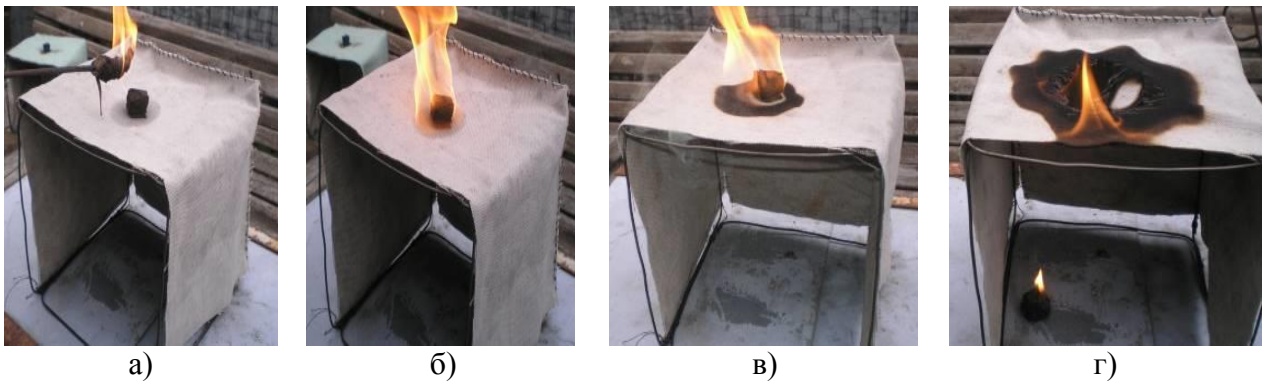


Рис. 4. Результати випробувань необробленого модельного зразка елементів намету, виготовлених з парусинової тканини: а – запалювання модельного вогнища; б – горіння запалювального пристрою; в – займання тканини; г – самостійне вигорання тканини

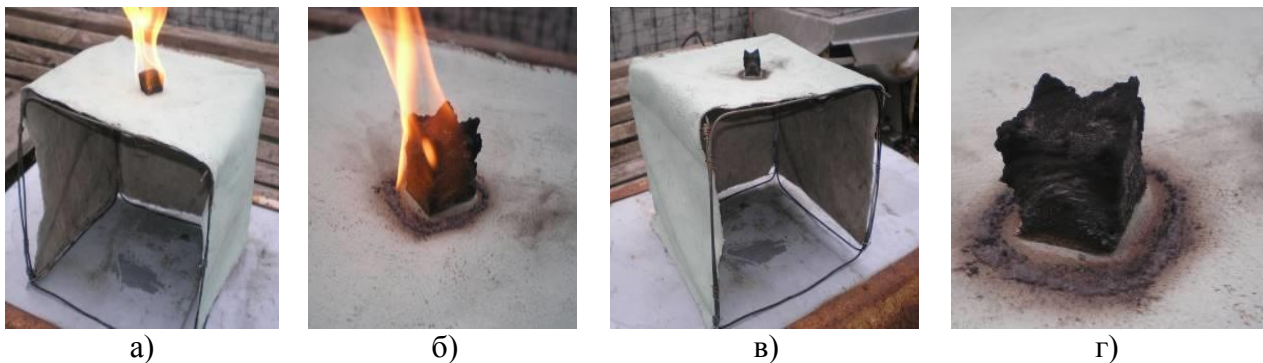


Рис. 5. Результати випробувань вогнезахисного модельного зразка елементів намету, виготовлених з парусинової тканини: а – запалювання модельного вогнища; б – горіння запалювального пристрою; в – обуглювання тканини; г – вогнище після горіння

Таблиця 2 – Результати випробувань модельного зразка елементів намету, виготовлених з парусинової тканини

| Модельний зразок намету виготовлений з парусинової тканини | Маса зразка, кг | | Час горіння зразка, с | Втрата маси зразка після випробувань $\Delta m, \%$ | Спучення, мм |
|--|-----------------|-------|-----------------------|---|--------------|
| | до | після | | | |
| необроблений | 0,29 | 0,01 | 114 | 100,0 | - |
| оброблений покриттям | 0,38 | 0,37 | 678 | 2,47 | 5...8 |

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, проведено моделювання процесу теплопровідності при захисті тканини інтумесцентним покриттям. При термічній дії високотемпературного полум'я на елементи намету, виготовлені з парусинової тканини, визначено температуру на поверхні тканини та отримані залежності, що дозволяють одержувати зміну теплового потоку на поверхні матеріалу при спученні покриття. За експериментальними даними і отриманими залежностями встановлено, що густина теплового потоку на необроблену тканину сягає понад 60 кВт/м^2 , що достатньо для її займання. Натомість, густина теплового потоку через утворений шар пінококсу не перевищила $8,2 \text{ кВт/м}^2$, чого недостатньо для її займання.

Результати натурних випробувань з визначення процесу передавання високої температури полум'я через покриття до тканини показали, що при дії полум'я на необроблені модельні зразки елементів намету, виготовлених з парусинової тканини відбувається її займання на 45 с та поширення полум'я поверхнею, що призводить до повного згорання протягом 108 с. Характер вигорання для модельного зразка елементів намету, який оброблений вогнезахисним інтумесцентним покриттям, показав відсутність поширення полум'я після вигорання вогнища та зафіксовано спучення захисного покриття, що сягало 7...8 мм.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на встановлення особливостей зниження теплопровідності при температурному впливі полум'я на будівельну конструкцію з вогнезахищеної тканини.

Подяка. Автори висловлюють подяку за фінансову підтримку роботи, виконаної в рамках бюджетного фінансування № 0121U001007, а також на розробку наукових тем у програмі наукового співробітництва COST Action CA20139 «Холістичне проектування більш високих дерев'яних будівель» (HELEN).

Література

1. Tsapko Yu., Sirko Z., Vasylyshyn R., Melnyk O., Tsapko A., Bondarenko O. Establishing patterns of mass transfer under the action of water on the hydrophobic coating of the fire-retardant element of a tent. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4. No 10 (112). P. 45-51. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.237884.
2. Tsapko Yu., Tsapko A., Bondarenko O., Chudovska V., Sotnikova I., Sotnikov D. Thermophysical characteristics of the formed layer of pinocox in fire protection of fabric by composition based on modified phosphorus-ammonied. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3. No 10 (111). P. 34-41. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.233479.
3. Horrocks A.R. High performance textiles for heat and fire protection. High Performance Textiles and their Applications. *Woodhead Publishing Series in Textiles*. 2014. P. 144-175. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857099075.144>.
4. Цапко Ю.В., Цапко О.Ю., Бондаренко О.П., Суханевич М.В. Аспекти розроблення вогнезахисних композицій для конструкцій з текстильних займистих виробів. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2021. Вип. 83. С. 93-101. DOI: 10.31650/2415-377X-2021-83-93-101.
5. Ma Y., Luo X., Liu L., Shang X., Yao J. Eco-friendly, efficient and durable fireproof cotton fabric prepared by a feasible phytic acid grafting route. *Cellulose*. 2021. Vol. 28 (6). P. 3887-3899. DOI:10.1007/s10570-021-03767-0.
6. Syed Rashedul I., Weidong Yu, Tayyab N. Influence of silica aerogels on fabric structural feature for thermal isolation properties of weft-knitted spacer fabrics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2019. Vol. 14. P. 1-11.
7. Alexandrescu L., Popa M., Georgescu M., Leca M. Development of new processes intended to obtain fireproof non-asbestos textiles covered with nanodispersions based on modified polychloroprene elastomers. *Industria Textila*. 2013. Vol. 64 (3). P. 277-284. URL: http://www.revistaindustriatextila.ro/images/2013/5_2013.pdf.
8. Zhu H., Kannan K. Determination of melamine and its derivatives in textiles and infant clothing purchased in the United States. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 710. 136396. P. 1-7. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.136396.
9. Ackerman M., Batcheller J., Paskaluk S. Off gas measurements from FR materials exposed to a flash fire. *AATCC Journal of Research*. 2015. Vol. 2 (2). P. 1-12. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.136396.
10. Lin C.-M., Lou C.-W., Lin J.-H. Manufacturing and Properties of Fire-Retardant and Thermal Insulation Nonwoven Fabrics with FR-Polyester Hollow Fibers. *Textile Research Journal*. 2009. Vol. 79 (11). P. 993-1000. URL: <https://doi.org/10.1177/0040517508090492>.
11. Tian Zhou, Xu Liu, Yuan Li, Zhiqiang Sun. Dynamic measurement of the thermal conductivity of phase change materials in the liquid phase near the melting point. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 111. P. 631-641. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.020.
12. Tsapko Yu., Bondarenko O., Tsapko A., Sarapin Y. Application of Coating for Fire Protection of Textile Structures. Materials and Technologies of Industrial Application. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 927. P. 115-121. URL: <https://www.scientific.net/KEM.927.115>.
13. Tsapko Yu., Tsapko A. Establishment of fire protective effectiveness of reed treated with an impregnating solution and coatings. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4. No 10 (94). P. 62-68. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141030>.
14. Potter M.C. *Engineering analysis*. New York: Springer. 2018. 444 p. URL:

<https://www.springer.com/gp/book/9783319916828>.

15. Zhang H., Li Y., Tao W.-Q. Theoretical accuracy of anisotropic thermal conductivity determined by transient plane source method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 108. P. 1634-1644. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.025>.

16. Janna W.S. *Engineering Heat Transfer*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2010. 692 p. URL: <https://www.routledge.com/Engineering-Heat-Transfer/Janna/p/book/9781420072020>.

References

- [1] Yu. Tsapko, Z. Sirko, R. Vasylyshyn, O. Melnyk, A. Tsapko, O. Bondarenko, "Establishing patterns of mass transfer under the action of water on the hydrophobic coating of the fire-retardant element of a tent", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, no. 10 (112), pp. 45-51, 2021. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.237884.
- [2] Yu. Tsapko, A. Tsapko, O. Bondarenko, V. Chudovska, I. Sotnikova, D. Sotnikov, "Thermophysical characteristics of the formed layer of pinocox in fire protection of fabric by composition based on modified phosphorus-ammonied", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 10 (111), pp. 34-41, 2021. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.233479.
- [3] A.R. Horrocks, "High performance textiles for heat and fire protection, High Performance Textiles and their Applications", *Woodhead Publishing Series in Textiles*, pp. 144-175, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1533/9780857099075.144>.
- [4] Yu.V. Tsapko, O.Yu. Tsapko, O.P. Bondarenko, M.V. Sukhanevich, "Aspects of development of fireproof compositions for structures with textile fuel products", *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, no. 86, pp. 86-95. 2022, DOI: 10.31650/2415-377X-2021-83-93-101.
- [5] Y. Ma, X. Luo, L. Liu, X. Shang, J. Yao, "Eco-friendly, efficient and durable fireproof cotton fabric prepared by a feasible phytic acid grafting route", *Cellulose*, vol. 28 (6), pp. 3887-3899, 2021. DOI:10.1007/10570-021-03767-0.
- [6] Syed Rashedul I., Weidong Yu, Tayyab N., "Influence of silica aerogels on fabric structural feature for thermal isolation properties of weft-knitted spacer fabrics", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 14, pp. 1-11, 2019.
- [7] L. Alexandrescu, M. Popa, M. Georgescu, M. Leca, "Development of new processes intended to obtain fireproof non-asbestos textiles covered with nanodispersions based on modified polychloroprene elastomers", *Industria Textila*, vol. 64 (3), pp. 277-284, 2013. [Online]. Available: http://www.revistaindustriatextila.ro/images/2013/5_2013.pdf.
- [8] H. Zhu, K. Kannan, "Determination of melamine and its derivatives in textiles and infant clothing purchased in the United States", *Science of the Total Environment*, vol. 710, 136396, pp. 1-7, 2020. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.136396.
- [9] M. Ackerman, J. Batcheller, S. Paskaluk, "Off gas measurements from FR materials exposed to a flash fire", *AATCC Journal of Research*, vol. 2 (2), pp. 1-12, 2015. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.136396.
- [10] C.-M. Lin, C.-W. Lou, J.-H. Lin, "Manufacturing and Properties of Fire-Retardant and Thermal Insulation Nonwoven Fabrics with FR-Polyester Hollow Fibers", *Textile Research Journal*, vol. 79 (11), pp. 993-1000, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0040517508090492>.
- [11] Zhou Tian, Liu Xu, Li Yuan, Sun Zhiqiang, "Dynamic measurement of the thermal conductivity of phase change materials in the liquid phase near the melting point", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 111, pp. 631-641. 2017. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.020.
- [12] Yu. Tsapko, O. Bondarenko, A. Tsapko, Y. Sarapin, "Application of Coating for Fire Protection of Textile Structures. Materials and Technologies of Industrial Application", *Key Engineering Materials*, vol. 927, pp. 115-121, 2022. [Online]. Available: <https://www.scientific.net/KEM.927.115>.
- [13] Yu. Tsapko, A. Tsapko, "Establishment of fire protective effectiveness of reed treated with an impregnating solution and coatings", *Eastern-European Journal Enterprise*

- Technologies*, vol. 4, no. 10 (94), pp. 62-68, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141030>.
- [14] M.C. Potter, *Engineering analysis*, New York: Springer, 2018. [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9783319916828>.
- [15] H. Zhang, Y. Li, W.-Q. Tao, "Theoretical accuracy of anisotropic thermal conductivity determined by transient plane source method", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 108, pp. 1634-1644, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.025>.
- [16] W.S. Janna, *Engineering Heat Transfer*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2010. <https://www.routledge.com/Engineering-Heat-Transfer/Janna/p/book/9781420072020>.

SIMULATION OF THE PROCESS OF HEAT TRANSFER TO TISSUE THROUGH INTUMESCENT COATING

^{1,2}**Tsapko Yu.**, Doctor of Technical Sciences, juryts@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0625-0783

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

³**Tsapko A.**, PhD, Senior Research Fellow, alekseytsapko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2298-068X

¹**Neroda V.**, master, v.nerodaa@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5139-866X

¹*Scientific Research Institute for Binders and Materials, Kyiv National University of Construction and Architecture Povitroflotsky ave., 31, Kyiv, 03037, Ukraine*

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

³*Ukrainian State Research Institute "Resurs" Kazimyra Malevicha str., 84, Kyiv, 03150, Ukraine*

Abstract. The problem of using fabric products for building structures for the storage and transportation of explosives is to ensure their resistance to fire and durability during operation, but it is necessary to take into account the change in their fire-resistant properties. Reducing the flammability and developing non-flammable and non-flammable materials is one of the main areas of preventing fires and solving the problem of expanding the scope of application of these materials. Treatment with fire retardants has a significant effect on the spread of the flame, allows you to significantly reduce the smoke-generating capacity and heat generation. Therefore, the object of research was canvas fabric, which was fireproofed with an intumescent coating. Simulations were carried out and dependences were obtained, which allow to calculate the value of the heat flow at the boundary "pinocoke layer - fabric" depending on the effect of temperature. It has been proven that in the process of thermal impact on the fabric, the process of transfer of high temperature and its ignition takes place. On the basis of the obtained results of field tests to determine the process of transferring high temperature of the flame through the coating, it was established that when the flame acts on untreated model samples of tent elements made of canvas fabric, it ignites at 45 C and the flame spreads over the surface, which leads to complete combustion for 108 s. The pattern of burning for a model sample of tent elements, which is treated with a fire-resistant intumescent coating, showed the absence of flame propagation after the fire burned out, and the swelling of the protective coating was recorded, reaching 7...8 mm. The practical value lies in the fact that the obtained results of determining the properties of canvas fabric fire-resistant with an intumescent coating make it possible to establish the conditions of operation of products and building structures based on it.

Keywords: fabric fire protection, intumescent coatings, heat flow, surface treatment, thermophysical properties.

Стаття надійшла до редакції 28.10.2022

ВПЛИВ ВЕЛИЧИНИ ПОХИЛУ НА РОЗРАХУНКОВІ ПАРАМЕТРИ ЗБІРНИХ ДРЕНАЖНИХ ТРУБОПРОВОДІВ¹**Кравчук А.М.**, д.т.н., професор,

kravchuk.am@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8732-9244

¹**Кравчук О.А.**, к.т.н., доцент,

kravchuk.oa2@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6578-8896

¹*Київський національний університет будівництва і архітектури*
пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03037, Україна

Анотація. Розглянута система з двох диференціальних рівнянь за допомогою яких описують рух рідини в дренажній трубі зі змінною витратою і умови входу рідини з навколишнього ґрунту через стінки в трубі в режимі фільтрації. Вона складається з рівняння гідравліки змінної маси і модифікованого рівняння фільтрації. Досліджуваний трубопровід прокладений з прямим похилом «*i*». Показано, що в даному випадку, без суттєвої похибки другим членом модифікованого рівняння фільтрації можна знехтувати. Шляхом введення нових змінних вихідна система зводиться до безрозмірного вигляду. Представлено розв'язок даної системи рівнянь у безрозмірному вигляді.

Показано, що в даному випадку розв'язок вихідної системи рівнянь залежить від величини трьох основних факторів: коефіцієнта опору збірною дренажного трубопроводу « ζ_r »; узагальненого параметра «*A*», який комплексно враховує конструктивні і фільтраційні характеристики розглядуваного потоку; геометричного похилу прокладання трубопроводу «*i*». При аналізі використано поняття нескінченно довгого дренажного трубопроводу, який прокладений з похилом, або, що те ж саме, похильного трубопроводу з нескінченною фільтраційною спроможністю стінок бічної поверхні. Відмічається, що такий трубопровід буде мати максимальну пропускну спроможність в порівнянні з таким же трубопроводом обмеженої довжини. На основі проведеного аналізу отримано відносно прості і зручні у використанні аналітичні залежності для розрахунку характеру зміни витрати і перепаду напорів за довжиною дренажного трубопроводу прокладеного з певним похилом.

За запропонованими формулами проведена серія розрахунків основних характеристик даних труб при різних значеннях похилу, для наочності побудовані відповідні графічні залежності. Показано, що величина геометричного похилу прокладання напірного дренажного трубопроводу, поряд з коефіцієнтом опору і узагальненим параметром, суттєво впливає на розрахункові параметри таких труб.

Ключові слова: збірний дренажний трубопровід, гідравлічний коефіцієнт тертя, коефіцієнт фільтрації, фільтраційний опір, геометричний похил дренажної труби, змінна витрата рідини.

Вступ. Як відомо, для забезпечення стабільних урожаїв в Україні досить розвинена і активно експлуатується система меліоративних заходів. При цьому головним елементом меліоративної системи є мережа дренажних трубопроводів за допомогою яких забезпечується необхідний вологісний режим ґрунту [1-3]. В залежності від місцевих умов дренажні трубопроводи можуть працювати в напірному і безнапірному режимі, бути прокладені горизонтально або мати певний похил. Крім того може мати похил або бути горизонтальним також і рівень ґрунтових вод на майданчику, що меліорується [4].

Вважається, що надходження рідини в збірний дренажний трубопровід здійснюється безперервно і нерівномірно за його довжиною. Суттєвий вплив на характер притоку повинен мати склад ґрунту та матеріал фільтруючої поверхні дренажних трубопроводів, відстань між

дренами і їх конструктивні особливості. Для врахування цих параметрів в даній роботі використано поняття фільтраційного опору дрени $\bar{\Phi}$ [5], який умовно вважається постійним вздовж дрени. Крім того відомо, що на характеристики потоку суттєво впливає наявність похилу дренажної труби.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питаннями розробки методики інженерного розрахунку напірних збірних дренажних трубопроводів в різних умовах присвячено досить велику кількість робіт [5-7]. При цьому розглядаються випадки роботи даних труб з рівномірним [8] і нерівномірним [9] приєднанням рідини вздовж шляху. Як правило, при аналізі роботи дренажних перфорованих трубопроводів застосовувались рівняння руху рідини зі змінною витратою [10]. Отримані на їх основі розрахункові залежності з тим чи іншим ступенем точності описують розглядуваний процес. Однак практично всі автори в своїх дослідженнях розглядали варіант горизонтальної прокладки дренажних труб, коли впливом похилу дренажного трубопроводу на його розрахункові параметрами можна знехтувати. Однак на практиці часто вплив похилу труби необхідно враховувати для отримання реальних результатів.

Мета та завдання. Метою даної роботи було на основі вирішення рівняння гідравліки змінної маси розробити методику інженерного розрахунку збірних напірних дренажних трубопроводів, які працюють при наявності похилу каналу. В результаті розрахунку при відомих конструктивних і фільтраційних характеристиках системи необхідно отримати відповідні гідравлічні параметри потоку або вирішувати зворотну задачу – при відомих гідравлічних параметрах розрахувати реальні конструктивні і фільтраційні характеристики системи.

Матеріали та методика досліджень. Представлена робота базується на результатах особистих аналітичних досліджень основних математичних залежностей, за допомогою яких описується рух напірного потоку рідини в збірних перфорованих трубопроводах, що прокладені з похилом.

Результати досліджень. Як вже вказувалось, при проектуванні меліоративних систем, в залежності від рельєфу місцевості, збірні дренажні трубопроводи можуть прокладатись як горизонтально, так і з прямим або зворотнім похилом. Під прямим похилом ($i > 0$) будемо розуміти випадок, коли відмітки лотка збірної дренажної труби знижуються за довжиною від початкового до кінцевого перерізу. Зворотнім похилом ($i < 0$) вважається протилежний варіант, коли відмітки лотка підвищуються вздовж труби. Поверхня ґрунтових вод при цьому приймається горизонтальною ($I = 0$).

Розглянемо основний, найбільш характерний, випадок роботи збірних дренажних трубопроводів без транзиту, прокладених з прямим похилом при горизонтальному рівні поверхні ґрунтових вод. Розрахункова схема роботи дрени для цього випадку приведена на рис. 1.

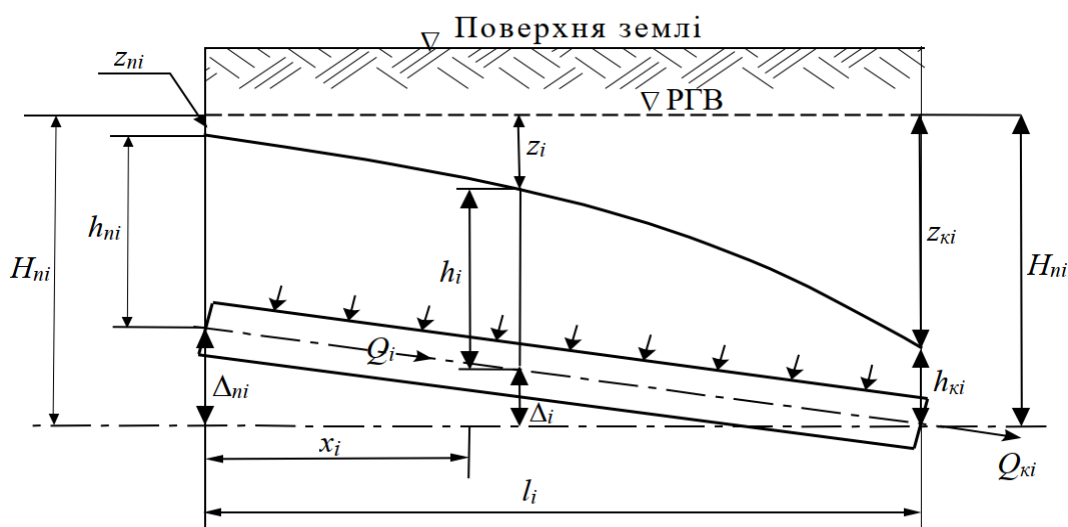


Рис. 1. Схема роботи похильного збірного дренажного трубопроводу при горизонтальному РГВ

Як відомо [11], рух рідини в даному випадку описується системою диференціальних рівнянь, яка складається з рівняння гідравліки змінної маси (1) і модифікованого рівняння фільтрації (2):

$$\frac{dh}{dx} + \frac{2}{g} V \frac{dV}{dx} + \frac{\lambda_{36}}{2gD} V^2 \pm i = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d(V\Omega)}{dx} = k_{\phi} \frac{z}{\Phi}, \quad (2)$$

де H – висота розташування рівня ґрунтових вод над горизонтальною площиною зрівняння в довільному перерізі труби (в кінцевому перерізі дрени це глибина занурення осі цього трубопроводу); h – п'єзометричний напір в трубі; z – змінний за довжиною перепаду напорів, під дією якого відбувається втікання рідини з навколишнього середовища в дренажний трубопровід; $\frac{\Delta_n}{l} = i$ – геометричний похил прокладання дренажного трубопроводу довжиною l ; $h = H - z - ix$; $dh = -dz - idx$; Q , V , D , Ω – відповідно, витрата, середня швидкість, діаметр і площа перерізу потоку на відстані x від початку труби; Φ – фільтраційний опір дрени; k_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації ґрунту навколо труби; λ_{op} – гідравлічний коефіцієнт тертя дренажного трубопроводу; g – прискорення вільного падіння.

Використавши наведені вище співвідношення, а також вівши нові змінні:

$$\bar{V}_i = \frac{V}{\sqrt{2gz_{\kappa}}}, \quad \bar{x}_i = \frac{k_{\phi} x}{\Omega \Phi} \sqrt{\frac{z_{\kappa}}{2g}}, \quad \bar{z}_i = \frac{z}{z_{\kappa}}, \quad (3)$$

вихідна система рівнянь зводиться до безрозмірного вигляду:

$$-\frac{d\bar{z}_i}{d\bar{x}_i} + 4\bar{V}_i \frac{d\bar{V}_i}{d\bar{x}_i} + \zeta_{l_{op}} A \bar{V}_i^2 \mp B = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d\bar{V}_i}{d\bar{x}_i} = \bar{z}_i, \quad (5)$$

де $\zeta_{l_{op}} = \lambda_{op} \frac{l}{D}$ – коефіцієнт опору збірної дренажного трубопроводу; $A = \frac{1}{\bar{x}_{\kappa}} = \frac{\Omega \Phi}{k_{\phi} l} \sqrt{\frac{2g}{z_{\kappa}}}$ – узагальнений параметр збірної дрени, який враховує її конструктивні і фільтраційні характеристики; $B = \frac{liA}{z_{\kappa}}$ – параметр, який враховує вплив похилу дренажного трубопроводу на характеристики потоку в ньому.

В наведених співвідношеннях індекс « i » відноситься до трубопроводу, який прокладений з похилом.

В рівнянні (4) другий член враховує втрати напору, які пов'язані з ефектом приєднання рідини вздовж шляху, третій – втрати напору на гідравлічне тертя, четвертий – вплив похилу дренажної труби.

Як показано в роботі [12], при розрахунку дренажних трубопроводів другим членом в рівнянні (4), в зв'язку з його відносно малою величиною, зазвичай нехтують. Тоді воно прийме вигляд:

$$\frac{d\bar{z}_i}{d\bar{x}_i} = \zeta_{l_{op}} A \bar{V}_i^2 \mp B. \quad (6)$$

Підставивши залежність (5) в (6) і, розділивши змінні, отримаємо:

$$\bar{z}_i d\bar{z}_i = \zeta_{l_{op}} A \bar{V}_i^2 d\bar{V}_i \mp B d\bar{V}_i. \quad (7)$$

Після інтегрування вираз (7) набуде вигляду [13]:

$$\frac{\bar{z}_i^2}{2} = \zeta_{l_{op}} A \frac{\bar{V}_i^3}{3} \pm B \bar{V}_i + C. \quad (8)$$

Константу інтегрування знаходимо з граничних умов: на початку труби $\bar{V}_{ni} = 0$; $\bar{z}_i = \bar{z}_{ni}$, тоді $C = \frac{\bar{z}_{ni}^2}{2}$.

Підставивши у (8), остаточно отримаємо:

$$\bar{z}_i^2 - \bar{z}_{ni}^2 = \frac{2A\zeta_{l_{op}}}{3} \bar{V}_i^3 \pm 2B\bar{V}_i. \quad (9)$$

Залежність (9) в кінцевому перерізі реальної похильної труби буде мати вигляд:

$$1 - \bar{z}_{ni}^2 = \frac{2A\zeta_{l_{op}}}{3} \bar{V}_{ki}^3 \pm 2B\bar{V}_{ki}. \quad (10)$$

Для подальшого аналізу використаємо поняття збірного дренажного трубопроводу нескінченної довжини ($l \rightarrow \infty$, $\zeta_{l_{op}} \rightarrow \infty$). Для нього перепадом напорів в початковому перерізі, у зв'язку з його малим значенням, можна знехтувати ($\bar{z}_{ni} \rightarrow 0$) (мала вищого порядку $\bar{z}_{ni}^2 \ll 1$). Тоді залежність (10) прийме вигляд:

$$\frac{2A\zeta_{l_{op}}}{3} \bar{V}_{k,\infty}^3 \mp 2B\bar{V}_{k,\infty} = 1, \quad (11)$$

$$\text{де } \bar{V}_{k,\infty} = \sqrt[3]{\frac{3}{2A\zeta_{l_{op}}}}.$$

Значення відносної швидкості в кінцевому перерізі похильного нескінченно довгого збірного дренажного трубопроводу розраховуємо як дійсний додатній корінь кубічного рівняння (11). Для полегшення розрахунків можна користуватись графіком на рис. 2, ($E = \frac{z_k}{2A\bar{V}_{k,\infty}}$).

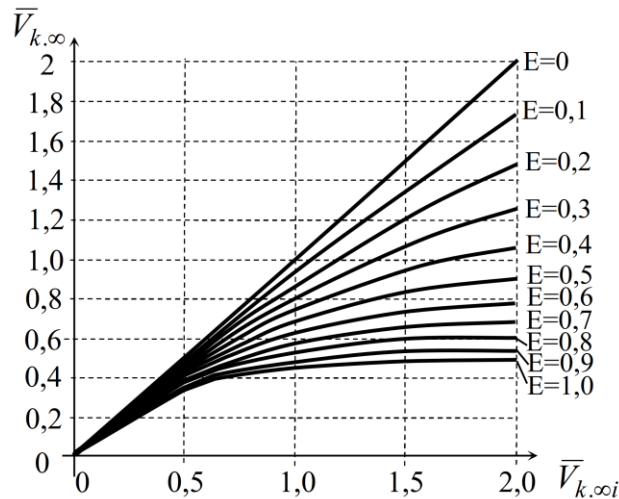


Рис. 2. Графік визначення коренів рівняння (11)

При $B = 0$ рівняння (11) переходить в залежність, що описує роботу горизонтального збірного дренажного трубопроводу.

Для подальшого аналізу введемо до розгляду поняття фіктивного горизонтального ($i = 0$; $B = 0$) збірного дренажного трубопроводу нескінченної довжини. При цьому даний трубопровід має основні характеристики, що забезпечують в його кінцевому перерізі таку ж

відносну швидкість (витрату), як у похильного дренажного трубопроводу нескінченної довжини, тобто для них справедливе співвідношення:

$$\bar{V}_{\phi, \kappa} = \bar{V}_{\kappa, \infty i} = \sqrt[3]{\frac{3}{2A\zeta_{l_{op}}}}. \quad (12)$$

Як показано в роботі [14], для фіктивного збірному горизонтального дренажного трубопроводу нескінченної довжини залежність між діючим відносним перепадом напорів і відносною швидкістю має вигляд:

$$\bar{z}_{\phi} = \sqrt{\frac{2A\zeta_{l_{op}}}{3} \bar{V}_{\phi}^3}. \quad (13)$$

Прирівнявши залежність (9), для нескінченно довгого похильного дренажного трубопроводу (за умови $\bar{z}_{n,i} \rightarrow 0$) і вираз (13), отримаємо:

$$\frac{2A\zeta_{l_{op}}}{3} \bar{V}_i^3 \mp 2B\bar{V}_i - \frac{2A\zeta_{l_{op}}}{3} \bar{V}_{\phi}^3 = 0. \quad (14)$$

З останнього кубічного рівняння, при відомому \bar{V}_{ϕ} , розраховуємо \bar{V}_i . Після його підстановки в залежність для описання величини відносної витрати в горизонтальному збірному трубопроводі:

$$\bar{V}_{\phi} = \bar{V}_{\phi, \kappa \infty} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{\bar{x}_{\phi, \kappa} - \bar{x}_{\phi}}{2\bar{V}_{\phi, \kappa \infty}}\right)^2} - \frac{1}{\left(1 + \frac{\bar{x}_{\phi, \kappa}}{2\bar{V}_{\phi, \kappa \infty}}\right)^2} \right], \quad (15)$$

і нескладних перетворень, знаходимо відносну відстань \bar{x}_i , при якій буде мати місце та сама за величиною відносна швидкість:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{A} - 2\bar{V}_{\phi, \kappa \infty} \left[\sqrt{\frac{1}{\frac{\bar{V}_i}{\bar{V}_{\phi, \kappa \infty}} + \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{2A\bar{V}_{\phi, \kappa \infty}}\right)^2}} - 1} \right]. \quad (16)$$

Для визначення співвідношень між \bar{x}_i і \bar{x}_{ϕ} , при яких відносні швидкості в перерізах реального похильного і фіктивного горизонтального трубопроводів будуть рівні ($\bar{V}_i = \bar{V}_{\phi}$), підставимо \bar{V}_{ϕ} з (14) в залежність отриману з (13), маємо:

$$\bar{z}_i = \sqrt{\frac{2\zeta_{l_{\infty}}}{3} A \bar{V}_{\phi, \infty i}^3 \mp 2B\bar{V}_{\phi, \infty i}}. \quad (17)$$

Звідси, з урахуванням (16), отримаємо:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{A} - 2\bar{V}_{\phi, \kappa \infty} \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\bar{z}_i}} - 1 \right). \quad (18)$$

Отже, вирази (16) і (18), відповідно, дозволяють визначити значення відносної координати \bar{x}_i реального трубопроводу в залежності від відносної координати \bar{x}_{ϕ}

фіктивного трубопроводу, при яких величини відносних напорів \bar{z}_i і \bar{z}_ϕ або швидкостей \bar{V}_i і \bar{V}_ϕ (витрат \bar{Q}_i і \bar{Q}_ϕ) будуть рівні між собою.

Приведений матеріал дозволяє запропонувати для використання методики розрахунку збірних дренажних трубопроводів з похилом для різних варіантів задач. Конкретний вигляд методики залежить від поставлених завдань.

Нижче приведена методика і приклад розрахунку витрати в кінцевому перерізі похильного дренажного трубопроводу.

Методика та приклад розрахунку. Визначити витрату в кінцевому перерізі похильного збірної дренажного трубопроводу з характеристиками:

$$D = 0,1 \text{ м}; H = 1,4 \text{ м}; h_k = 0,3 \text{ м}; \lambda_{об} = 0,035; l = 200 \text{ м};$$

$$k_\phi = 0,5 \text{ м/доб} = 0,000023 \text{ м/с}; \bar{\Phi} = 0,8; i = 0,005.$$

1. Знаходимо перепад напорів в кінці трубопроводу і його площу поперечного перерізу:

$$z_k = H - h_k = 1,4 - 0,3 = 1,1 \text{ м}; \quad \Omega = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{4 \cdot 0,1^2}{4} = 0,00785 \text{ м}^2.$$

2. Визначаємо коефіцієнт опору збірної дренажного трубопроводу $\zeta_{l_{op}}$; узагальнений параметр збірної дрени A ; параметр який враховує вплив похилу дренажного трубопроводу B :

$$\zeta_{l_{op}} = \lambda_{op} \frac{l}{D} = 0,035 \frac{200}{0,1} = 70; \quad B = \frac{liA}{z_k} = \frac{200 \cdot 0,005 \cdot 5,31}{1,3} = 4,08.$$

$$A = \frac{1}{\bar{x}_k} = \frac{\Omega \bar{\Phi}}{k_\phi l} \sqrt{\frac{2g}{z_k}} = \frac{0,00785 \cdot 0,8}{0,000023 \cdot 200} \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81}{1,3}} = 5,31; \quad \bar{x}_k = \frac{1}{A} = \frac{1}{5,31} = 0,19.$$

Розрахунок здійснюємо із застосуванням безрозмірних змінних:

$\bar{V}_i = \frac{V}{\sqrt{2gz_k}}$ – безрозмірна швидкість в довільному перерізі;

$\bar{x}_i = \frac{k_\phi x}{\Omega \bar{\Phi}} \sqrt{\frac{z_k}{2g}}$ – безрозмірний параметр;

$\bar{z}_i = \frac{z}{z_k}$ – безрозмірний перепад напорів.

3. Розраховуємо значення безрозмірної швидкості в кінцевому перерізі нескінченно довгого горизонтального дренажного трубопроводу:

$$\bar{V}_{к\infty} = \sqrt[3]{\frac{3}{2A\zeta_{l_{op}}}} = \sqrt[3]{\frac{3}{2 \cdot 5,31 \cdot 70}} = 0,16.$$

4. Значення відносної швидкості в кінцевому перерізі нескінченно довгого похильного трубопроводу знаходимо з кубічного рівняння (11):

$$\frac{\bar{V}_{к,\infty i}^3}{\bar{V}_{к\infty}^3} - 2B\bar{V}_{к,\infty i} = 1,$$

$$\frac{\bar{V}_{к,\infty i}^3}{0,16^3} - 2 \cdot 4,08 \cdot \bar{V}_{к,\infty i} = 1.$$

Маємо $\bar{V}_{к,\infty i} = 0,227$.

5. Переходячи до розмірних величин, отримаємо:

$$V_{к,\infty i} = \bar{V}_{к,\infty i} \cdot \sqrt{2gz_k} = 0,227 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,3} = 1,146 \text{ м/с}.$$

6. В розмірних одиницях витрата в кінцевому перерізі збірної похильного дренажного трубопроводу становить:

$$Q_k = V_{к,\infty i} \cdot \Omega = 1,146 \cdot 0,00785 = 0,009 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Висновки. В роботі на основі аналізу диференційних рівнянь, які описують рух рідини в збірних напірних дренажних трубопроводах, які прокладені з похилом i , запропоновано відносно прості аналітичні залежності і допоміжні графіки для їх розрахунку. При проведенні аналізу введено поняття нескінченно довгого похильного дренажного трубопроводу або трубопроводу з нескінченною величиною просякнення бічної поверхні стінок труби. Оцінено вплив величини похилу на розрахункові параметри таких труб при їх різних конструктивних характеристиках. Наведено приклад розрахунку кінцевої витрати похильного дренажного трубопроводу. Приведені формули рекомендуються для застосування в широкому діапазоні зміни параметрів дренажних трубопроводів, що прокладені з похилом. Для подальшого розвитку даного напрямку досліджень вважаємо за необхідне більш детальне вивчення внутрішньої гідродинаміки потоку рідини в збірних дренажних трубопроводах.

Література

1. Schultz B., De Wrachien D. Irrigation and drainage systems research and development in the 21st century. *Irrigation and Drainage*. 2002. Vol. 51. No 4. P. 311-327. doi.org/10.1002/ird.67.
2. Ромашенко М.І., Балюк С.А., Вергунов В.А., Вожегова Р.А., Жовтоног О.І., Рокочинський А.М., Тараріко Ю.О., Трускавецький Р.С. Сталий розвиток меліорації земель в Україні в умовах змін клімату. *Аграрні інновації*. 2020. Вип. 3. С. 59-64. doi.org/10.32848/agraar.innov.2020.3.10.
3. Турченко В.О., Рокочинський А.М., Вовк П.П., Приходько Н.В., Ричко Д.М. Комплекс заходів з підвищення ефективності функціонування рисових зрошувальних систем. *Вісник НУВГП. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 4. вип. 84. С. 3-21. doi.org/10.31713/vt420181.
4. Кравчук А., Кравчук О. Оцінка впливу похилу на характеристики напірних збірних дренажних трубопроводів. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2022. Вип. 40. С. 26-30. doi.org/10.32347/2524-0021.2022.40.26-30.
5. Олейник О.Я., Поляков В.Л. Дренаж переувлажненних земель. К.: Наукова думка, 1987. 279 с.
6. Мурашко А.И., Климов В.Т., Сапожников У.Г. Указания по фильтрационным расчетам горизонтального трубчатого дренажа. Минск: БелНИИМиВХ, 1977. 44 с.
7. Cherniuk V., Hnativ R., Kravchuk O., Orel V., Bihun I., Cherniuk, M. The problem of hydraulic calculation of pressure distribution pipelines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 6. No. 7 (114). P. 93-103. doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246852.
8. Дмитриев А.Ф. О гидравлическом расчете дренажных трубопроводов. *Гидротехника и меліорація*. 1980. Вып. 11. С. 57 – 59.
9. Чернюк В.В., Іванів В.В., Ценюх М.Б. Нерівномірність притоку води до напірного трубопроводу-збирача залежно від кута приєднання вхідних струменів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, вип. 9. С. 116-120. doi.org/10.36930/40290920.
10. Kravchuk A., Kochetov G., Kravchuk O. Improving the calculation of collecting perforated pipelines for water treatment structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6, No. 10(108). P. 23-28. doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216366.
11. Кравчук А., Кочетов Г., Кравчук О. Проектування трубопроводів для рівномірного збору води вздовж шляху. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2020. Вип. 33. С. 34-40. doi.org/10.32347/2524-0021.2020.33.34-40.
12. Kravchuk O.A. Particularities of hydraulic calculation of collecting pressure drainage pipelines. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2021. No. 83. P. 130-138. doi.org/10.31650/2415-377X-2021-83-130-138.
13. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Перевод с английского Н.В. Леви под редакцией К.А. Семендяева. М.: Наука, 1977. 228 с.

14. Кравчук А.М., Чернишев Д.О., Кравчук О.А. Гідравліка напірних перфорованих трубопроводів очисних споруд систем водопостачання та водовідведення: монографія. К.: КНУБА, 2021. 203 с.

Reference

- [1] B. Schultz, D. De Wrachien, "Irrigation and drainage systems research and development in the 21st century", *Irrigation and Drainage*, vol. 51, no. 4, pp. 311-327, 2002. doi.org/10.1002/ird.67.
- [2] M.I. Romashchenko, S.A. Baliuk, V.A. Verhunov, R.A. Vozhehova, O.I. Zhovtonoh, A.M. Rokochynskiy, Yu.O. Tarariko, R.S. Truskavetskiy, "Sustainable development of land reclamation in Ukraine in the conditions of climate change", *Agrarian Innovations*, no. 3, pp. 59-64, 2020. doi.org/10.32848/agrar.innov.2020.3.10.
- [3] V.O. Turcheniuk, A.M. Rokochynskiy, P.P. Volk, N.V. Prykhodko, D.M. Rychko, "Complex of measures to improve the efficiency of functioning of figured extractive systems", *Bulletin of NUWEE. Technical Sciences*, vol. 4, no. 84, pp. 3-21, 2018. doi.org/10.31713/vt420181.
- [4] A. Kravchuk, O. Kravchuk, "Assessment of the slope influence on the pressure collecting drainage pipelines characteristics", *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, no. 40, pp. 26-30, 2022. doi.org/10.32347/2524-0021.2022.40.26-30.
- [5] O.Ya. Oleynik, V.L. Poliakov, *Drenazh pereuvlazhnennykh zemel*. Kiev: Naukova dumka, 1987.
- [6] A.I. Murashko, V.T. Klimov, U.G. Sapozhnikov, *Ukazaniya po filtratsionnyim raschetam gorizontalnogo trubchatogo drenazha*. Minsk: BelNIIMiVH, 1977.
- [7] V. Cherniuk, R. Hnativ, O. Kravchuk, V. Orel, I. Bihun, M. Cherniuk, "The problem of hydraulic calculation of pressure distribution pipelines", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 7 (114), pp. 93-103. doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246852.
- [8] A.F. Dmitriev, "O gidravlicheskom raschete drenazhnykh truboprovodov", *Gidrotehnika i melioratsiya*, no. 11, pp. 57-59, 1980.
- [9] V.V. Cherniuk, V.V. Ivaniv, M.B. Tsenyuh, "Dependence of non-uniformity of water inflow into pressure pipeline-collector on the angle of inflowing jets", *Scientific Bulletin of UNFU*, vol. 29, no. 9, pp. 116-120, 2019. doi.org/10.36930/40290920.
- [10] A. Kravchuk, G. Kochetov, O. Kravchuk, "Improving the calculation of collecting perforated pipelines for water treatment structures", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 10 (108), pp. 23-28, 2020. doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216366.
- [11] A. Kravchuk, G. Kochetov, O. Kravchuk, "Pipelines designing for steady water collection along the path", *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulics*, no. 33, pp. 34-40, 2020. doi.org/10.32347/2524-0021.2020.33.34-40.
- [12] O.A. Kravchuk, "Particularities of hydraulic calculation of collecting pressure drainage pipelines", *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, no. 83, pp. 130-138, 2021. doi.org/10.31650/2415-377X-2021-83-130-138.
- [13] G.B. Dvayt, *Tablitsyi integralov i drugie matematicheskie formulyi*, Perevod s angliyskogo N.V. Levi pod redaktsiey K.A. Semendyaeva. M: Nauka, 1977.
- [14] A.M. Kravchuk, D.O. Chernyshev, O.A. Kravchuk, *Hidravlika napirnykh perforovanykh truboprovodiv ochysnykh sporud system vodopostachannia ta vodovidvedennia*. Kyiv: KNUCA, 2021.

THE SLOPE INFLUENCE ON CALCULATED PARAMETERS OF COLLECTING DRAINAGE PIPELINES

¹**Kravchuk A.M.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
kravchuk.am@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8732-9244

¹**Kravchuk O.A.**, PhD, Associate Professor,
kravchuk.oa2@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6578-8896

¹*Kyiv National University of Construction and Architecture*
31, Povitroflotsky Ave., Kyiv, 03037, Ukraine

Abstract. System of two differential equations, which describe the liquid motion in a drainage pipeline with variable flow rate and the conditions of liquid entry from the surrounding soil through the walls of the pipe in filtration mode, is considered. It consists of a variable mass hydraulics equation and a modified filtration equation. The explored pipeline is laid with a direct slope " i ". It is shown that in this case, the second term of modified filtration equation can be neglected without significant error. By introducing new variables, the original system is reduced to a dimensionless form. The solution of this equations system in dimensionless form is presented.

In this case the solution of the original equations system depends on the value of three main factors: the resistance factor of the collecting drainage pipeline " ζ_l "; the generalized parameter " A ", which comprehensively takes into account the structural and filtering characteristics of the stream; the geometric slope of pipeline laying " i ". The analysis used the concept of an infinitely long drainage pipeline, which is laid with a slope, or, what is the same, an inclined pipeline with an infinite filtering capacity of the side surface walls. It is noted that such pipeline will have the maximum throughput compared to the same pipeline of limited length. Relatively simple and easy-to-use analytical dependencies were obtained on the basis of the conducted analysis. They allow to calculate the nature of the flow rate variations and pressure drop along the length of the drainage pipeline laid with a certain slope.

A series of calculations of the explored pipelines main characteristics were carried out according to the proposed formulas at different values of the slope. Corresponding graphic dependencies were constructed for clarity. It is shown that the value of the geometric slope of the pressure drainage pipeline, along with the resistance factor and the generalized parameter, significantly affects the calculated parameters of such pipelines.

Keywords: collecting perforated pipeline, hydraulic friction factor, hydraulic conductivity, filtration resistance, geometric slope of the drainage pipe, variable fluid flow.

Стаття надійшла до редакції 16.10.2022

WATER QUALITY OF LAKE KATLABUKH

Miedviediev Oleh, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
oleg-med-oggme@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2273-4625

SE "Black Sea Center for Water Resources and Soils"
street Tatarbunary Vostaniya, 2a, Tatarbunary, 68100, Ukraine

Miedviedieva Olha, junior researcher,
mdvdv_olga@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3575-0592

Radioenvironmental Centre of the National Academy of Sciences of Ukraine
St. O. Honchara, 55-B, Kyiv, 01054, Ukraine

Abstract. The soil and thermal resources of the Odessa region allow growing a variety of agricultural crops with a yield much higher than currently obtained. But this is possible only when using irrigation. The southwestern part of the region has such a powerful source of water as the Danube River, from which irrigation is carried out and the lakes Cahul, Yalpus, Katlabukh, China and a number of reservoirs are filled. For a number of reasons, after 2000 the actual amount of irrigated land has decreased significantly. Along with this, the quality of water in reservoirs changes, and sometimes they disappear from the map. At the state level, various programs are being adopted to restore irrigation in the southern regions of Ukraine without understanding the presence and hydrochemical composition of the waters of reservoirs.

To do this, it is necessary to conduct a detailed analysis of the presence of water bodies and assess their chemical composition. This work is devoted to one of the sources of water supply for the national economy, namely Lake Katlabukh.

Lake Katlabukh is used as the main source of irrigation for three state systems - Suvorivskaya, Izmailskaya and Kislytskaya (formerly Kirovskaya) irrigation systems (IS) and small irrigation areas (SIA) on an area of 16.671 hectares. In addition, the Loschinivske, Kaminske, Banivske and Muravlivske reservoirs were additionally filled with lake waters to irrigate 22063 hectares within the limits of the Loschinivske, Tashbunarske, Muravlivske and Banivske IS and the SIA adjacent to them.

The aim of the work is to analyze the hydrochemical state and assess the quality of water according to agronomic criteria over a thirty-year period of one of the lakes, the waters of which have been and continue to be used for irrigation.

To solve this problem, materials of hydrochemical observations were collected and processed. The main indicators of anionic and cationic composition, mineralization index and pH are summarized and averaged for every five years from 1991 to 2020. Separately, data for 2021 is given. To assess the quality of water according to agronomic criteria, all indicators were calculated according to the latest methodology. The main reasons for the deterioration of water quality have been identified.

Keywords: water quality, agronomic indicators, irrigation water, mineralization, reservoir.

Introduction. The hydrochemical and nutritional regime, physical and physicochemical properties, and, accordingly, the fertility of the soil are largely determined by the quality of irrigation water. Water with high mineralization leads to salinization, and water with low mineralization leads to excessive salinization and leaching of nutrients from the soil. Water with an unfavorable ratio of monovalent and divalent cations causes salinization, alkalization and soil degradation.

Climatic features of the region are that the limited factor that limits the amount of yield is the lack of moisture. It was possible to increase the yield only by supplying water to the fields with a certain agricultural technology. Irrigation in this territory was carried out in a small amount in pre-war times, it began to develop in 1947, when the government of the Ukrainian SSR made a decision on watering and irrigation of the Izmail region [1]. But intensive construction began in 1966.

Irrigated areas in 1966 amounted to 31.5 thousand ha, in 1991 – about 240 thousand hectares [2]. At the beginning of 2022 this figure has hardly changed.

From 1991 to the present, the land that is actually irrigated has decreased significantly and the quality of water for irrigation has changed. Several main reasons contributed to this: *land reclamation* – many new landowners appeared, who are economically unable to irrigate their small plots of land and maintain meliorative systems in a satisfactory condition; *introduction of paid water use* – led to a decrease in water use by consumers, partial or complete cessation of preventive discharges and flushing of reservoirs; *various "optimizations"* led to a decrease in the personnel potential of water management departments and uncertainty regarding the further development of irrigation. Weather and climatic conditions together with the hydrological regime of the Danube River, the main supplier of water for reservoirs used for irrigation, also play an important role.

Analysis of recent research and publications. Mechanisms of interaction between irrigation water, soil solutions and the solid part of soils are very complex and diverse. This explains the fact that several methods were used to assess the quality of water during the period of the research given in this paper [3-5].

Until 1995 criteria proposed by M.F. Budanov, O.M. Mozheyko were used to assess water quality. and Vorotnik G.H. The assessment was carried out by determining the mineralization of water. From the point of view of the danger of salinization according to Budanov M.F. water is suitable for all types of soil, if the total mineralization does not exceed 1 g/dm³. With a mineralization of 1-3 g/dm³, water can be used for irrigation if the fraction of dividing the sum of concentrations of all mineral substances in mg-eq/dm³ by the sum of calcium and magnesium concentrations does not exceed 4 for medium and heavy loamy soils, 5 for loamy soils and 6 for sandy and sandy soils.

As an indicator that evaluates the possibility of salinization of soils during irrigation, various authors used mathematically expressed ratios between monovalent and divalent cations in irrigation water in different ways. Mozheyko O.M. and Vorotnik G.H. for these purposes, the value of the ratio of the amount of Na⁺+K⁺ to the sum of all cations in mg-eq/dm³ was used. At the same time, if the ratio is less than 0.65, then the waters were considered safe in terms of salinization of the soil: 0.66-0.75 – dangerous, and more than 0.75 – very dangerous. According to Budanov M.F. water is unsuitable for irrigation if the ratio of Na⁺ to Ca²⁺ is greater than 1 or the ratio of Na⁺ to the sum of Ca²⁺ and Mg²⁺ is greater than 0.7.

In order to change this approach to the assessment of irrigated waters by the order of the State Standard of Ukraine N^o 194 dated 07.29.1994 a new standard was introduced, which was developed under the leadership of S.A. Balyuk [4]. According to agronomic indicators, water quality was evaluated according to five indicators: the danger of secondary salinization, salting and alkalizing of soils, toxic effects on plants, and thermodynamic indicators. Such an indicator as water mineralization in this standard is not taken into account at all.

In 2016, SSU 2730-94 was replaced by the order of SE "UkrSRSC" dated June 22, 2015 according to N^o 61, a new standard for assessing the quality of irrigation water according to agronomic criteria was introduced, which is used nowadays [5]. The assessment is also carried out according to the main five indicators. It differs from the previous one mainly in the determination of the amount of toxic salts in chlorine equivalents, the assessment of the danger of salinization, and numerical gradations in the assessment of water quality by all five indicators.

Lake Katlabukh was and is used as the main source of irrigation for three state systems – Suvorivska, Izmailska and Kislytska (formerly Kirovska) irrigation systems (IS) and small irrigation areas (SIA) on an area of 16.671 hectares. In addition, the Loschinivske, Kaminske, Banivske and Muravlivske reservoirs were additionally filled with lake waters to irrigate 22.063 hectares within the limits of the Loschinivske, Tashbunarske, Muravlivske and Banivske IS and the SIA adjacent to them.

The analysis of the existing materials shows the practical absence of thorough scientific publications by specialists on the quality of water in the Danube reservoirs, and in particular in Lake Katlabukh and reservoirs that have been filled with its waters since 1991. Individual

publications cover only certain periods [6-11] or generalized global issues [12].

The goal of the work. The main increase in water needs in the near future may be associated, first of all, with the restoration and development of irrigation not only in Odesa, but also in other southern regions, which, in particular, is provided for by the corresponding concept and conceptual approaches, which are the basis of the strategy for the restoration of work and development of irrigation systems in Ukraine [13]. The concept envisages increasing the irrigated area in the Odesa region by 100,000 hectares. In addition, according to the idea of the authors of the report on scientific research work, it is possible to improve the water supply of other southern regions of Ukraine at the expense of water from the Danube River. But the implementation of the principles specified in [12, 13] is impossible without an analysis of the dynamics of the hydrochemical state, suitability and prospects for use on certain significant water bodies in the southwestern part of Odesa. Therefore, the *subject of the study* was Lake Katlabukh, as one of the main water bodies of irrigation and on which the condition of four more reservoirs, mainly in the Izmail district, depends.

Materials and research methodology. Lake Katlabukh is filled in the interfluent period with the Danube River by the main pumping station (MPS), with a supply volume of 11.1 m³/s, and during floods – by gravity through the existing "Zhelyavsky" channel, at the head of which there is a two-way regulator lock. Water withdrawal from the reservoir to the irrigation arrays is carried out by four pumping stations: at the Suvorivska IS – PS-1 and PS-2; to the Izmailsk IS – MPS and to the Kyslytsk IS – MPS. In order to supply water to the irrigation network, pumping stations (PSS) were built. In order to connect the emergency water supply with the PSS water intake, they have regulating tanks-pools and main channels. Pools carry out daily regulation, connecting the uneven stepped supply of water into a closed grid. Water was supplied to the Loschinivske, Kaminske, and Banivske reservoirs through the pipeline system from PS-2 of the Suvorivska IS and MPS of the Izmailsk IS; to the Muravliv reservoir from PS-1 Suvorivska IS.

Until 1995-2000, irrigation was carried out by sprinkler machine (SM) "Volzhanka", two-console sprinkler unit – 100, partly by SM "Fregat". After 2000 in the structure of irrigation, the share of these aggregates was significantly reduced and drip irrigation appeared.

To analyze the water quality in the reservoirs, the results of chemical analyzes were collected and analyzed, which were taken directly at the PS and MPS during 1991-2021 and were carried out by the laboratory of the Odesa Hydrogeological and Reclamation Expedition (1991-2017) and the water monitoring laboratory of the Southern Region of the Separate Subdivision "Black Sea Center for Water Resources and Soils" (2018-2021). For ease of understanding, the obtained data were averaged for every five years, namely 1991-1995; 1996-2000; 2001-2005; 2006-2010; 2011-2015; 2016-2020 Data for 2021 are given separately.

To assess water quality according to agronomic criteria, SSU-2730-2015 "Quality of natural water for irrigation" was used. Agronomic criteria" [5].

Regulation of the quality of irrigation water according to agronomic criteria determines the quality of water for irrigation by its influence on:

- 1) soils, in order to preserve and increase fertility, as well as prevent the processes of salinization, salting, lithification and violation of the biological regime;
- 2) ensuring the planned yield of agricultural products, productivity and intensity of development;
- 3) the necessary quality of agricultural products, their completeness and good quality.

Standardization of irrigation water quality indicators according to agronomic criteria was carried out taking into account the composition and properties of soils in conditions when the level of groundwater does not exceed the critical level under the recommended irrigation regimes.

Agronomic criteria for assessing the quality of irrigation water were evaluated according to the following indicators: danger of irrigation soil salinization; the danger of soil calcification; danger of toxic effects of irrigation water on plants; the danger of salinization of the soil, the value of pH and water temperature.

Assessment of the quality of irrigation water according to the danger of irrigation salinization of soils was carried out on the basis of the indicator of the total concentration of toxic ions (in

chlorine equivalents), taking into account the group of soils and their granulometric composition (SSU 7908). The risk of soil alkalization was assessed taking into account the comprehensive assessment of most indicators – the value of the hydrogen index (pH), toxic alkalinity and alkalinity from normal carbonates (SSU ISO 10390, SSU 7845, SSU 7943) [5]. Assessment of the quality of irrigation water according to the danger of its toxic effect on plants was determined by the hydrogen indicator, the content of alkalinity from normal carbonates, the content of chlorine and the sum of toxic salts in chlorine equivalents. The danger of salting of soils was determined by the ratio (in percent) of the sum of alkaline cations of sodium and potassium to the sum of all cations, taking into account the main types of irrigation soils, their anti-saline buffering capacity and granulometric composition of soils, the amount of excess of magnesium over calcium in irrigation water, and the class of water according to danger calcification of soils.

When assessing the quality of irrigation water, three classes of its suitability are distinguished: Class I – "*Suitable*", Class II – "*Limited suitability*" and "*Unsuitable*" (Class III).

Research results. For the assessment of water quality according to agronomic criteria, during the period given in the work, various methods were used, therefore, based on previously obtained data, we assessed water quality according to the last one [5]. Chemical composition of water and assessment of its quality according to agronomic criteria during 1991-2021 shown in Table 1. In total, more than 270 water samples were analyzed.

Table – 1 Assessment of the quality of irrigation water according to agronomic criteria

| Date of selection | Assessment of the quality of irrigation water by hazard | | | | | |
|-------------------|---|-------------|---------------------|---------------------------------------|---|-------------|
| | Secondary salinization | | Alkalinity of soils | | | |
| | Concentration of toxic ions, mg-eq dm ³ | Water class | pH | CO ₃ mg-eq dm ³ | HCO ₃ - Ca mg-eq dm ³ | Water class |
| 1991-1995 | 10.49 | I | 8.26 | 0.44 | 1.66 | II |
| 1996-2000 | 12.97 | I | 8.4 | 0.16 | 2.36 | II |
| 2001-2005 | 17.93 | I | 8.34 | 0.50 | 2,7 | II |
| 2006-2010 | 19.06 | II | 8.63 | 0.74 | 6.06 | III |
| 2011-2015 | 17.41 | I | 7.98 | 0.37 | 2.85 | II |
| 2016-2020 | 21.77 | II | 8.06 | 0.27 | 6.06 | II |
| 2021 | 16.76 | I | 8.32 | 0.47 | 3.17 | II |

| Date of selection | Assessment of the quality of irrigation water by hazard | | | | | | | |
|-------------------|---|---------------------------------------|--------------------------|---|-------------|---|---|-------------|
| | Toxic effect on plants | | | | | Isolation of soils | | |
| | pH | CO ₃ mg-eq dm ³ | CL mg-eq dm ³ | Concentration of toxic ions mg-eq dm ³ | Water class | Class of water according to the danger of soil alkalization | The ratio of sodium and potassium cations to the sum of all cations % | Water class |
| 1991-1995 | 8.26 | 0.44 | 5.28 | 10.49 | II | II | 58.92 | III |
| 1996-2000 | 8.4 | 0.16 | 7.91 | 12.97 | II | II | 67.41 | III |
| 2001-2005 | 8.34 | 0.5 | 10.56 | 17.93 | II | II | 75.12 | III |
| 2006-2010 | 8.63 | 0.74 | 9.86 | 19.06 | II | III | 76.43 | III |
| 2011-2015 | 7.98 | 0.37 | 10.56 | 17.41 | II | II | 62.31 | III |
| 2016-2020 | 8.06 | 0.27 | 13.56 | 21.77 | II | II | 73.98 | III |
| 2021 | 8.32 | 0.47 | 9.73 | 16.76 | II | II | 57.04 | III |

In Lake *Katlabukh*, the water is chloride-sulfate, magnesium-sodium, less often sulfate-chloride, sodium-magnesium. The mineralization index varies on average from 1.09 to 2.29 g/dm³, with the variability of the minimum and maximum indicators being 0.35-2.29 g/dm³ and 1.98-4.30 g/dm³, respectively. At the same time, there is a gradual increase in the average and maximum indicators in the dynamics. The vast majority of waters are slightly salty according to the mineralization index [14]. According to the hydrogen indicator, the water is mostly alkaline – 7.98-8.63, although in some samples acidic properties were recorded – 6.23-6.90. It is characterized by a significant natural content of sulfates (8.25-18.69 mg-eq/dm³) and sodium ions (8.00-20.07 mg-eq/dm³), to a lesser extent – chlorides (5.28-11.56 mg-eq/dm³) and magnesium ions (6.16-12.89 mg-eq/dm³), which significantly affects water quality according to agronomic criteria. Since the concentration of the above-mentioned components increases with the mineralization index. According to most of the studied agronomic indicators, the water quality belongs to the II class, i.e. to "limited suitability". According to the danger of salting of soils, as a result of the increased ratio of the amount of alkaline cations of sodium and potassium, taking into account the magnesium content, to the amount of cations – up to III class, that is – "unusable".

Conclusions. Until 1991 the average annual rainfall did not exceed 400 mm. After that, there is a gradual increase from 400 to 500 mm, and in some years more than 500 mm (Fig. 1). At the same time, the number of days with precipitation and their intensity are changing, more and more precipitation is torrential in nature (Fig. 2).

Long-term observations of the dynamics of water quality in Lake *Katlabukh* testify to a significant change in water quality, which was influenced and is influenced by several main factors, namely: *de-soldering of land, introduction of paid water use, various "optimizations" of the water industry, etc.* An important role is played by weather and *climatic conditions together with the hydrological regime of the Danube River*, the main supplier of water for reservoirs used for irrigation.

The above-mentioned reasons, in turn, contributed to the change in water quality in reservoirs, and in our case, in Lake *Katlabukh*. In the reservoir, there is a gradual increase in the mineralization index, the concentration of the main ions (SO₄²⁻; Cl⁻; Na⁺; Mg²⁺). Everything is certainly reflected in the suitability of water for irrigation according to agronomic criteria. Mostly, according to most agronomic indicators, water quality belongs to class II, i.e. to "limited suitability". "Unsuitable" (III class) only due to the danger of salinization of soils, due to the increased ratio of the amount of alkaline cations of sodium and potassium, taking into account the magnesium content, to the amount of cations.

Implementation of the "Irrigation Strategy..." [13] is impossible without state support and regulation. At the same time, support should not be declarative, but nominal, financial. Without this, not only will the quality of water in lakes, reservoirs, and ponds not improve, but they may disappear altogether, as many reservoirs have already disappeared. In the conditions of "regulation" of the reservoir, in our opinion, it is necessary to carry out a number of priority measures with the involvement of state support, namely, conducting a bathometric survey, clearing and deepening suitable channels, increasing the actual irrigated land, etc.

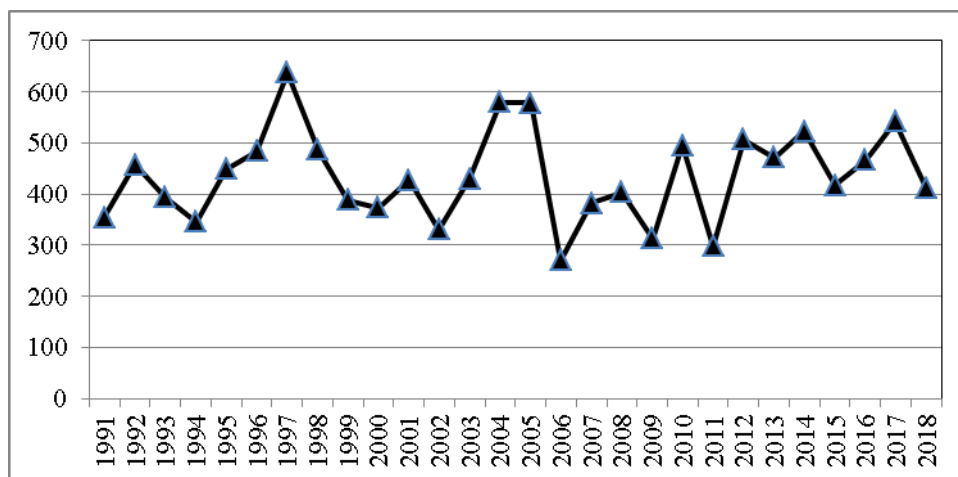


Fig. 1. Annual rainfall (mm) according to the data of the Tatarbunar balance measurement station

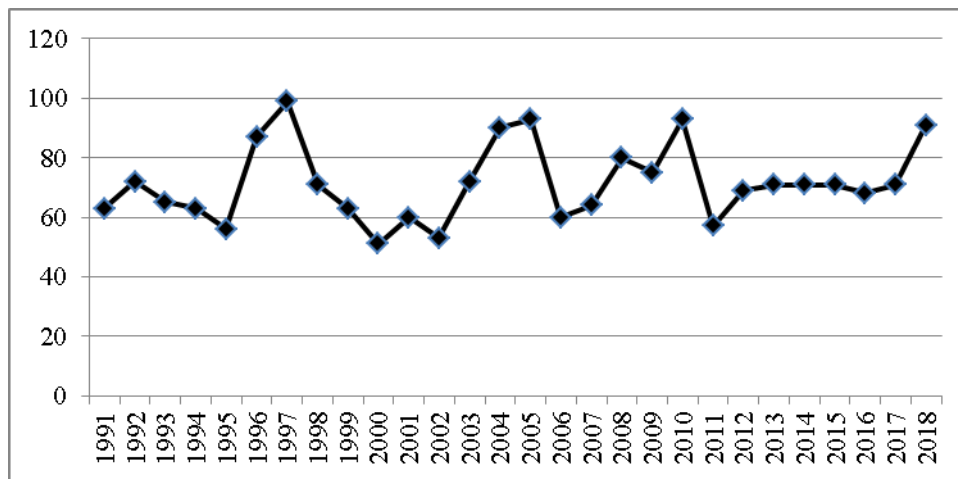


Fig. 2. Annual number of days with precipitation according to the Tatarbuniar balance measurement station

References

- [1] Generalnaya shema obvodneniya i orosheniya Izmail'skoi oblasti. Svodnaya zapiska. Ministerstvo s/h USSR, Ukrgidromelisproekt. Kyiv, 1948.
- [2] I.N. Gogolev, R.A. Baer, A.G. Kulibaban, "Oroshenie na Odeshsh'ine. Pochvenno-ekologicheskie i agrotehnicheskie aspekti", Odessa, 1992.
- [3] Metodicheskie ukazaniya po organizacii i provedeniyu korolya za kachestvom polivnoi vodi v sisteme Minvodhoza USSR. Odessa, OGGME. 1985.
- [4] Kachestvo prirodnoi vodi dlya orosheniya (Agronomicheskie kriterii). DSTU 2730-94. Kyiv, "Gosstandart Ukraini". 1995.
- [5] Iakist pryrodnoi vody dlia zroshennia (Ahronomichni kryterii). DSTU 2730-2015. Kyiv, DP "UkrNDNTS". 2016.
- [6] O. Miedviediev, "Khimichni stan ta zabrudnenist osnovnykh dzherel zroshennia pivdennoho zakhodu Odeskoi oblasti", *Vodne hospodarstvo Ukrainy*, no. 1-2, pp. 23-27, 2003.
- [7] O. Miedviediev, O. Miedviedieva, "Podhod k ocenke kachestva prirodnykh vod pri provedenii vodno-ekologicheskogo monitoringa", Kyiv, *Vodni resursi Ukrayini ta melioraciya zemel*, pp. 59-60, 2013.
- [8] O. Miedviediev, "Hidrokhimichni sposterezhennia na vodnykh ob'ektakh Odeschyny v 2013 rotsi", *Vodne hospodarstvo Ukrainy*, no. 5, pp. 32-35, 2014.
- [9] O. Miedviediev, "Iakist vody za ahronomichnymy pokaznykamy v osnovnykh dzherelakh zroshennia Odeskoi oblasti v 2017 rotsi", *Klimatychni zminy ta silske hospodarstvo. Vyklyk dlia aharnoi nauky ta osvity*, Kyiv, pp. 49-52, 2018.
- [10] O. Miedviediev, "Hidrokhimichni stan dzherel zroshennia Odeschyny v 2020 rotsi", *Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku melioratsii zemel*, Dnipro, pp. 33-34, 2020.
- [11] Rozporiadzhennia KMU vid 14.08.2019r. № 688-r "Pro skhvalennia Stratehii zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku". [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80#Text>.
- [12] Zvit pro naukovo-doslidnu robotu "Doslidyty riven vodozabezpechenosti pivdennykh rehioniv Ukrainy ta vyznachyty shliakhy ioho pidvyshchennia na osnovi zaluchennia vodnykh resursiv richky Dunai", Kyiv, IVPiM NAANU, 2016.
- [13] A.P. Blazhko, K.I. Anisimov, V.S. Osadchyi, "Hidrokhimichni monitorynh vodnykh resursiv Pivnichno-Zakhidnoho Prychornomoria", Odesa: ODABA, 2020.
- [14] P.V. Gordeev, V.A. SHemelina, O.K. SHulyakova, "Rukovodstvo k prakticheskim zanyatiyam po gidrogeologii: ucheb.posob", Visshaya shkola, Moskva, 1981.

ЯКІСТЬ ВОДИ ОЗЕРА КАТЛАБУХ

Мєдвєдєв О.Ю., к.геол.-мін.н.,

oleg-med-oggme@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2273-4625

ВП «Причорноморський центр водних ресурсів та ґрунтів»

вул. Татарбунарського повстання, 2а, м. Татарбунари, 68100, Україна

Мєдвєдєва О.О., м.н.с.,

mdvdv_olga@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3575-0592

ДУ "Науково-інженерний центр радіогідрогеоекологічних полігонних досліджень

національної академії наук України"

вул. О. Гончара, 55-Б, м. Київ, 01054, Україна

Анотація. Ґрунтові та теплові ресурси Одеської області дозволяють вирощувати різноманітні сільськогосподарські культури з врожайністю значно вище, аніж які отримують на даний час. Але це можливо тільки при використанні зрошення. Південно-західна частина області в своєму розпорядженні має таке потужне джерело води як річка Дунай з якої проводиться зрошення і заповнюються озера Кагул, Ялпуг, Катлабух, Китай і низки водосховищ. З ряду причин після 2000 року фактична кількість зрошуваних земель значно скоротилася. Разом з цим змінюється якість води в водоймах, а подекуди вони зникають з мапи. На державному рівні приймаються різноманітні програми по відновленню зрошення в південних областях України без розуміння наявності і гідрохімічного складу вод водойм. Для цього необхідно провести детальний аналіз наявності водойм і оцінити їх хімічний склад. Дана робота присвячена одному з джерел водопостачання для народного господарства, а саме озеру Катлабух.

Озеро Катлабух використовується як основне джерело зрошення для трьох державних систем – Суворівської, Ізмаїльської та Кислицької (в минулому Кіровської) зрошувальних систем (ЗС) і ділянок малого зрошення (ДМЗ) на площі 16671 га. Окрім цього водами озера додатково заповнювалися Лоцінівське, Камінське, Банівське і Муравлівське водосховища для зрошення 22063 га в межах Лоцінівської, Ташбунарської, Муравлівської і Банівської ЗС і прилягаючих до них ДМЗ.

Метою роботи є аналіз гідрохімічного стану і оцінка якості води за агрономічними критеріями за більш тридцятирічний період одного з озер, води котрого використовувалися і продовжують використовуватися для зрошення і інших господарських потреб.

Для вирішення даної проблеми зібрані і оброблені матеріали гідрохімічних спостережень. Основні показники аніонного і катіонного складу, показник мінералізації і рН зведені і опосередковані за кожні п'ять років з 1991 по 2020 роки. Окремо наведені дані за 2021 рік. Для оцінки якості води по агрономічним критеріям були обраховані всі показники за останньою методикою. Визначені основні причини погіршення якості води.

Ключові слова: якість води, агрономічні показники, зрошувальна вода, мінералізація, водойма.

Стаття надійшла до редакції 3.11.2022

**LANDSLIDE PROTECTION STRUCTURE IN THE FORM
OF COUNTERFORTS MADE OF BORED PILES**

¹**Osadchy V.S.**, PhD., Assistant Professor,
ovs1455@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8153-8635

¹**Anisimov K.I.**, Assistant Professor,
anisimov@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-0447-3927

¹**Baadzhi V.G.**, Assistant,
baadzhi@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-6974-9082

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

Abstract. At present, we are witnessing an intensive urbanization which is also typical for most regions of Ukraine. As consequence, there is an increase in the anthropogenic pressure on certain territories that's why the problem of the development of such phenomena as landslides has become particularly relevant. The landslides are one of the most common exogenous geological processes creating environmental and technogenic hazards. The reasons for their activation can be divided into natural and man-made. The landslide processes of natural origin arise, as a rule, on the coast, on the slopes of river valleys and in the network of gullies and ravines. The technogenic landslides are observed in the construction sector, reconstruction and operation of buildings and structures built on a plot of slopes with difficult engineering and geological conditions. With the aim of preventing the occurrence of landslides and related emergencies of a man-made and natural nature, it is necessary to implement economically and environmentally sound anti-landslide measures before the start of economic development of landslide and landslide hazard areas.

In building on landslide and landslide hazard slopes or on artificial slopes, it is necessary to keep large masses of soil in stable state. The occurrence and activation of landslides leads to the formation of unacceptable deformations, disruption of the slope stability as well as the destruction of buildings and structures. The deformations of buildings and structures located on or near slopes occur from landslide processes that cannot be stopped by regular landslide prevention works. In these cases, retaining anti-landslide structures made of bored and cast-in-place piles embedding in stable bedrocks and combined with reinforced concrete grille are used to protect against the formation of landslides. Such structures are one of the most optimal, technological and cost-effective methods for stabilizing landslide dislocations. The choice of the anti-landslide retaining structures type and their location on the slope depends on the value of the shear stress and its distribution along the slope, the power of the shear rock mass, the configuration of the slope, the state of shear at the time of building and other factors.

In this work, the main existing structures of transverse and longitudinal retaining pile-type anti-landslide structures, their advantages and disadvantages, conditions of application were analyzed. As a result of this, a new design retaining anti-landslide structure with increased loadability and reduced consumption of materials has been proposed. The landslide protection structure is made in the form of the counterforts run parallel to the length of the shear slope formed of round bored piles, whose diameter increases in the direction of shear displacement. While, the piles are laid with their lower ends in firm grounds and combined from above with reinforced concrete grille of variable height with an inclination of the bottom surface towards base of slope. This structure is designed to stabilize landslide hazard and landslide slopes as well as to increase stability of the slopes plots on which buildings and structures for various purposes are operated, reconstructed and built.

Keywords: slope, sliding surface, landslide protection structure, bored piles, counterfort, girder grill, "diaphragm wall".

Introduction. The landslides are among one of the most dangerous exogenous geological processes. They lead to the destruction of buildings and structures, loss of valuable agricultural land, damage to roads and railways, death and injury to people. The main natural factors that cause the landslides development and activation are the geological structure, the hydrogeological conditions, the lay of the land, the climate, the intensity of nontectonic activity as well as the technological impact.

On the territory of Ukraine, the greatest spread of landslides was observed in Odessa, Trans Carpathian, Ivano-Frankivsk, Kiev, Chernivtsi, Dnepropetrovsk and other regions. In the Odessa region, more than 5 thousand landslides were registered and the area of landslide hazard areas occupies almost 20% of the region's territory. In recent years, landslides were increasingly taking place in the territory not only of the city, but also in other settlements of the Odessa region (Chernomorsk, Sanzhiyka, Fontanka). The abrasion processes and related avalanching-landslide developments developed on the coast form a threat of destruction of residential and public buildings, resort complex facilities and communications. The current state of the coast, within populated areas, requires the urgent application of systematic measures to conduct construction, reconstruction or repair of landslide prevention structures.

The number of residents of large cities of Ukraine was increasing year by year resulting in the need to build additional housing, commercial and office space, recreational complexes. In this context, there is a need for construction development of the plots with complex engineering-geological conditions on which landslide processes are developed. This leads to the activation existing and new man-caused landslides. While, it is necessary to solve the issue of ensuring the stability of large masses of soil by using landslide prevention structures.

The landslide prevention structures of engineering protection include structures perceiving shear stress of a landslide masses of soil and are designed to increase the coefficient of slope marginal stability. The main ones are bored piles with or without girder grill, keys that cross the weakened zone and are fixed in a strong stable base, supporting walls, counter berms, counterforts as well as anchorages [1]. The choice of the retaining landslide prevention structures type depends on many factors such as engineering-geological and hydrogeological conditions of the construction site, the lay of the land, the kind and amount of the operating loads, the power of the shear rock mass, the state of slope at the time of building, the significance and cost of objects to be protected. In engineering practice, pile structures laid in firm groundside most widely used as the most economical and technological. They are optimal for the power of the shear rock mass up to 15-20 m. With increasing shear depth and increasing value of the shear stress, the construction of such structures is associated with large amounts of work and significant material consumption.

On the basis of the above, of particular practical interest are new pile-type retaining landslide prevention structures. And also it must be effective structures with increased loadability and reduced consumption of materials designed to stabilize landslide hazard and landslide slopes plots.

Analysis of designs of retaining landslide prevention structures made of bored piles. The retaining landslide prevention structures are used to prevent landslide and avalanching deformations if it is impossible or economically impractical to use other engineering protection equipment. These structures, in the landslide prevention system, in many cases (mountainous terrain, urban development etc.) are the only structures the use of which allows to fix the landslide site or increase the stability of the slope in a landslide hazard area [2].

One of the most effective landslide prevention structures of engineering protection are structures made of deep-embedded bored and cast-in-place piles (single-row and multi-row) located across the landslide masses, laid in a strong underlying layer and combined from above with reinforced concrete grille. In some cases, it is allowed to use inclined piles and driven piles. The prefabricated driving piles are used at low shear power and only when they are immersed in pilot boreholes or by pile pressing method [3, 4].

The single-row structure made of bored and cast-in-place piles is installed with a relatively low power of the shear body. It can be made in the form of piles located with a certain step close to each other (tangential piles) or with an overlap (bored piles). At significant depths of the shear rock mass, the multi-row structure should be installed. The use of a multi-row structure makes it possible to significantly improve the structural scheme of landslide prevention structure through the formation of multi-stable frame in the ground. The distance between the piles and their location on the slope should exclude flow around and pushing through the ground.

With increasing shear stress, bored piles are affected by large bending moments in value which leads to increasing the number of piles or their diameters. This results in increased the volume of drilling operations and material expenditures. It should be noted that both single-row and multi-row structures don't always work at rotational slips [5]. In the event of exposure of high-power shear body, extreme horizontal load is transmitted to the piles and Internal forces are produced for which it is impossible to select reinforcement at selected pile diameter, both in transverse force and bending moment. As a consequence, the piles do not correspond to ultimate limit state, namely, to the strength of the pile material.

Recently, anchors that fix the girder grill to the bedrock have been increasingly used as part of the structures of pile landslide prevention retaining structures [6]. Such pile structures with anchored girder grill become a few economical than usual pile landslide retaining structures because anchoring the head of the structure can reduce the number of rows of piles, their diameters and lengths. However, the mechanism of interaction of elements of pile-anchor structures of landslide prevention structures has not yet been sufficiently explored. The reliability and safety of such structures is ensured by the choice of large sizes of structural elements and the use of inflated assurance coefficients [7].

In some cases, when there is marked sliding surface of the shear masses, key-piles can be used [8, 9]. The keys are used with a relatively low-power of the main deformed horizon and the possibility of laying in firm bedrocks. The distance between the keys and the depth of embedding in firm bedrocks are determined by calculations based on the conditions for preventing soil penetration between the keys. The mark on the top of the keys is determined from the condition of avoiding to produce "crawling" effect.

In the field of geotechnics, there are also longitudinal retaining structures (deep-laid pile counterforts) [10] which hold the shear masses by point resistance and side friction. In doing so, the piles forming the counterforts can be located with a certain step or close to each other and the piles diameter can increase in the direction of the shear body displacement [11]. The retaining landslide prevention structures made of counterforts formed by separate piles cannot be used to stabilize deep landslides because each pile of which the counterfort is made, works as a separate element.

Among the large number of retaining landslide prevention structures types which are protected by patents and copyright certificates of different countries, it is also possible to highlight vertical walls laid in the underlying soils of the base and located along the landslide with a decrease in the distance between adjacent walls. The vertical walls formed by rows of drilling piles and combined with a reinforced concrete grille and mounted in such a manner that they form separate wedge-like structures [12]. The disadvantages of these structures can also be attributed to need to install a large number of piles and the impossibility of their use to hold large in value horizontal loads.

If it is necessary to perceive large shear stresses, separate piles are replaced by bored piles [6] which are made using the "diaphragm wall" method. The use of the "diaphragm wall" method allows the use of retaining landslide prevention structures even if there are fluid soils on the slope. The disadvantage of this structure is that its construction is associated with large amounts of work and significant material consumption.

Goal and tasks of the study. The goal of the work is to develop an effective landslide prevention structure, increased loadability and reduced consumption of materials designed to stabilize landslide hazard and landslide slopes as well as to increase stability of the slopes plots on which buildings and structures for various purposes are operated, reconstructed and built.

The desired goal was achieved by solving the following tasks of the study:

- to perform an analysis of designs of pile-type retaining landslide prevention structures;
- to analyze designs of longitudinal retaining structures in form of deep-laid pile counterforts;
- to develop design of landslide prevention structure in the form of counterforts made of bored piles row;
- to perform numerical modeling of interaction of masses of soil with elements of retaining structures.

Study methods. The goal of the work was achieved by analyzing existing designs of the pile-type retaining landslide prevention structures, the results of on-site inspections of landslide and landslide hazard areas of real slopes of Odessa (on the French Boulevard, on the territory of the Greek Park, on Dumskaya Square) as well as the results of numerical modeling of interaction of masses of soil with elements of retaining structures.

Results of the study. The work presents a new design of a pile-type retaining landslide prevention structure which is made in the form of the counterforts run parallel to the length of the shear slope. Thus, the counterforts formed of round bored piles, whose diameter increases in the direction of shear displacement. The bored piles are laid with their lower ends in firm grounds and combined from above with reinforced concrete grille.

The authors of the article filed applications for useful model patent and invention in Ukraine. The design of retaining landslide protection structure in the form of counterforts made of bored piles is shown in Fig. 1-3.

The landslide protection structure is made in the form of counterforts, whose longitudinal axes are parallel to each other, consisting of bored piles 1 of different diameters, which are installed in the shear masses of the soil 2, cut through the sliding surface 3 and buried by the lower ends in stable bedrock 4. The counterforts are combined with each other from above with reinforced concrete grille 5 of variable height with an inclination of the bottom surface.

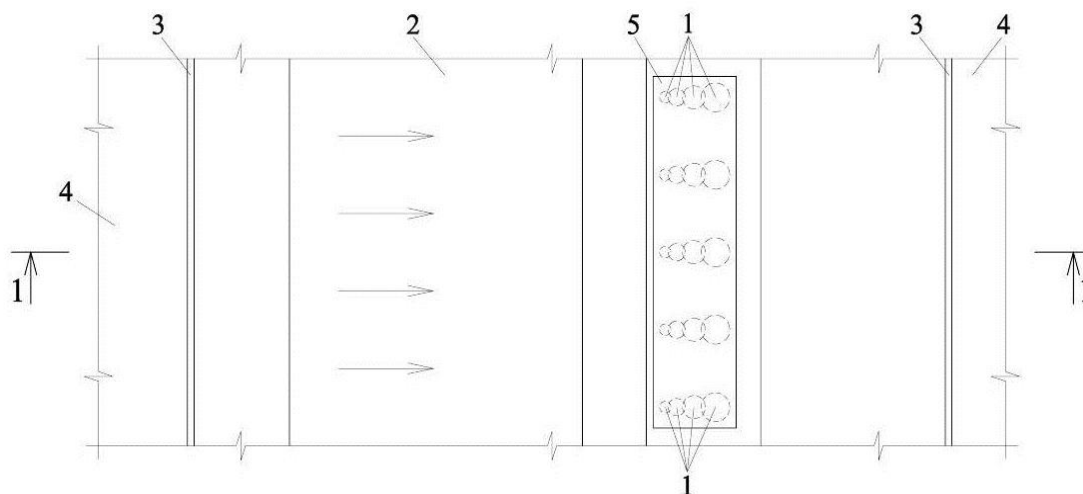


Fig. 1. Plan of the landslide prevention structure

The landslide prevention structure is being constructed as follows. After execution the works on clearing and planning the site as well as breakdown and securing the axes of the structure, drilling wells for bored piles of the largest diameter begins and filling the wells with a concrete mixture to the full height. Then drilling wells for bored piles of a smaller diameter (through one diameter) and performing their concreting.

At the next stage, after a set of concrete insignificant strength, starting to drill wells for bored piles of intermediate diameter with drilling the edges of neighboring piles.

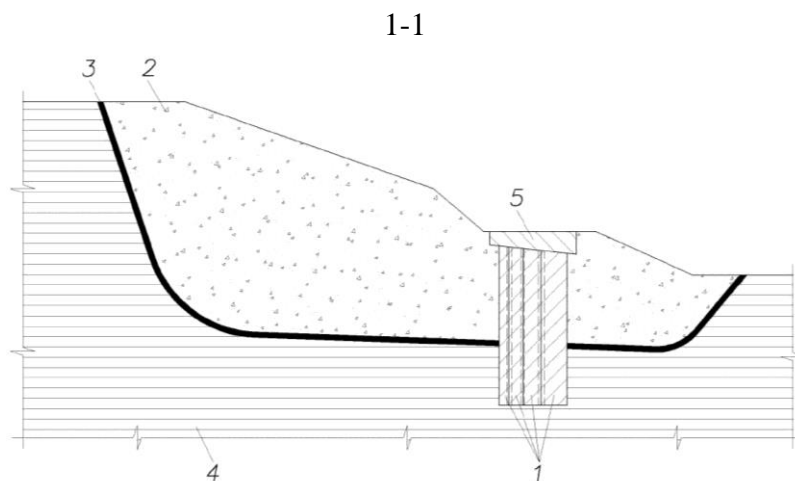


Fig. 2. Cross-section of landslide prevention structure

Other bored piles forming counterforts are arranged in a similar way, whose longitudinal horizontal axes are parallel to each other and coincide with the direction of shear masses displacement. The reinforcement is performed after one pile, neighbouring bored piles are still concrete. It is also possible to reinforce all bored piles with frames of the appropriate shape which does not prevent further work. The number of piles forming counterforts and their diameters depends on the specific natural conditions. After manufacturing all bored piles forming counterforts, starting to install monolithic reinforced concrete grille.

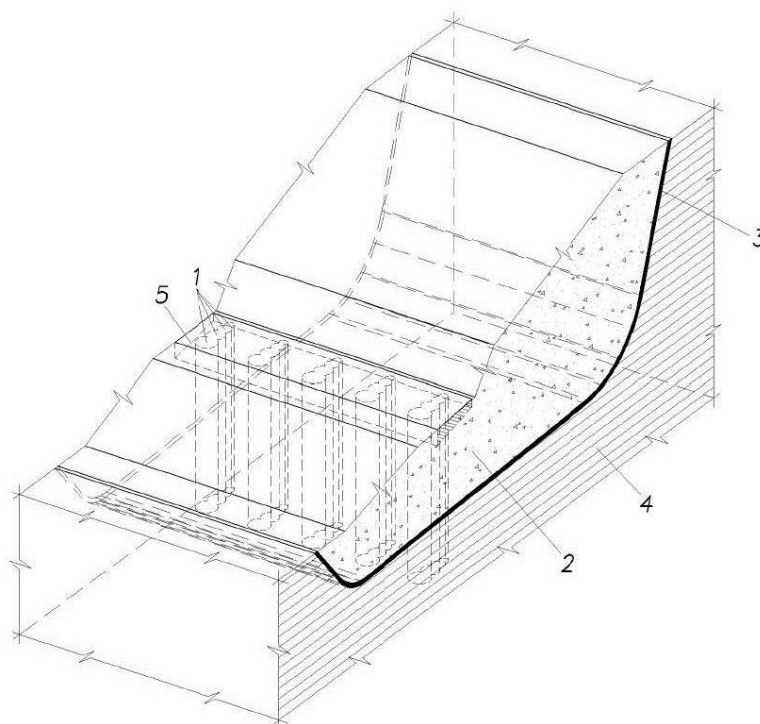


Fig. 3. General view of the landslide prevention structure

The landslide prevention structure works in the following way. When the shear activated, the shear masses of the soil 2 is displaced towards the counterforts which resist the shear stress by their point resistance and side friction. As the shear body moves, the ground is pushed into the space between the counterforts. As a result of the ground compression, additional reactions of counterforts side thrust appear creating additional forces of friction. The interaction of the ground with the rough side surfaces of the counterforts leads to an increase in forces of friction. The girder grille of variable height with

inclined bottom surface contributes to the compaction of the ground pushed between the piles and the appearance of forces of friction along the girder grill bottom surface. The significant forces of friction combined with compaction of the ground lead to its jamming between the counterforts. After that, row of counterforts together with the ground operate as a single retaining cement-bound wall.

In order to assess the economic efficiency of the proposed design of the retaining landslide prevention structure, idealized three-dimensional finite element design schemes were constructed (Fig. 4, 5) and a numerical experiment was performed. The numerical experiment was implemented in the licensed geotechnical software package Midas GTS NX. Previously, geometric models were created in the BricsCAD software package and then imported directly into Midas GTS NX.

The physical and mechanical properties of the grounds making up slope, the geometric profile and the sliding surface configuration are taken in accordance with the real ground and topographic conditions that are inherent in the slopes of the Odessa Black Sea coast.

The numerical experiment consisted in determining the stress-strain state of the ground masses and the coefficient of slope marginal stability for two variants of designs of retaining landslide prevention structures. In the design schemes, the pile structures and the ground masses are defined as three-dimensional finite elements. The soil behavior is described by Mohr-Coulomb model. The strength of ground layer of the disturbed structure is taken equal to 0.5 m. The contact of the ground with the field elements of landslide prevention structures is carried out via planar interface. The step and diameters of the piles were selected so that when each of the variants of landslide prevention structures was used to hold the shear body, the same coefficient of marginal stability were obtained.

Variant 1 (Fig. 4). The design of the landslide prevention structure is made in the form of counterforts made of bored piles. The diameters of the piles forming the counterforts are 1000, 800 and 600 mm. The length of the piles is assumed to be 23 m, the piles laying depth below the sliding surface is 6 m. The length of the counterforts is 2.1 m, the step of the counterforts is 2.5 m.

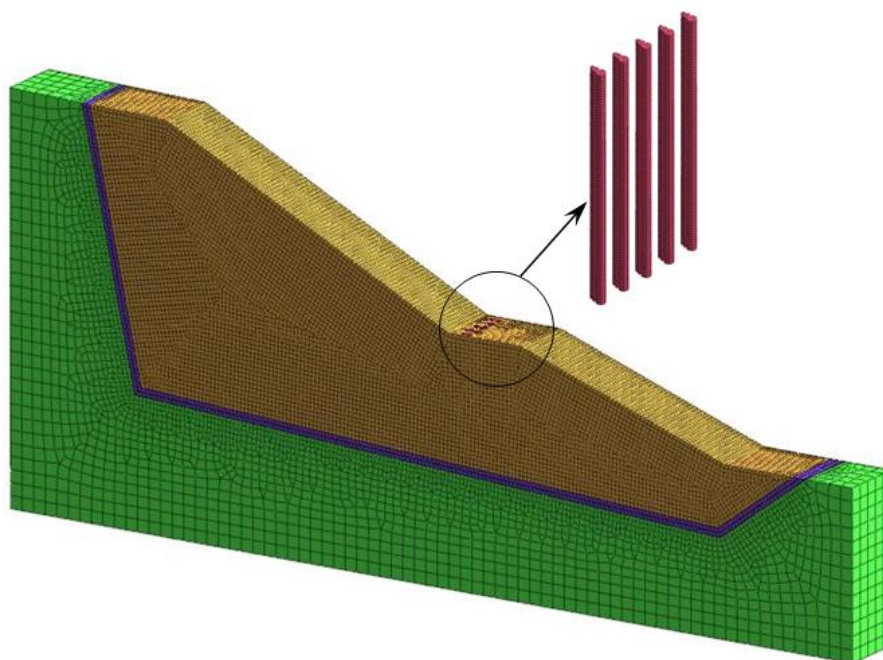


Fig. 4. General view of the design schemes with the landslide prevention structure in the form of counterforts made of bored piles with diameter 1000, 800 and 600 mm (variant 1)

Variant 2 (Fig. 5). The landslide prevention structure is made of two rows of bored piles with diameter of 1000 mm. The length of the piles is assumed to be 23 m, the piles laying depth below the sliding surface is 6 m. The step of piles and the distance between rows is 2 m.

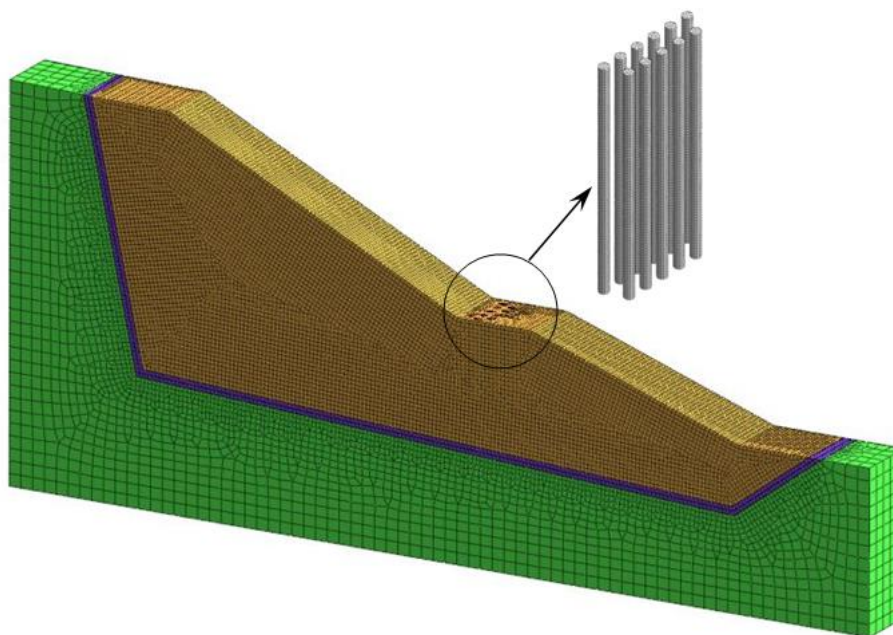


Fig. 5. General view of the design scheme with a landslide prevention structure consisting of two rows of bored piles with a diameter of 1000 mm (variant 2)

As a result of determining the stress-strain state in the calculated slope, zones of maximum shearing strengths were obtained (Fig. 6) on the soil of the disturbed structure and the value of the coefficient of marginal stability obtained by reduction method (reduction of strength), which was 1.22.

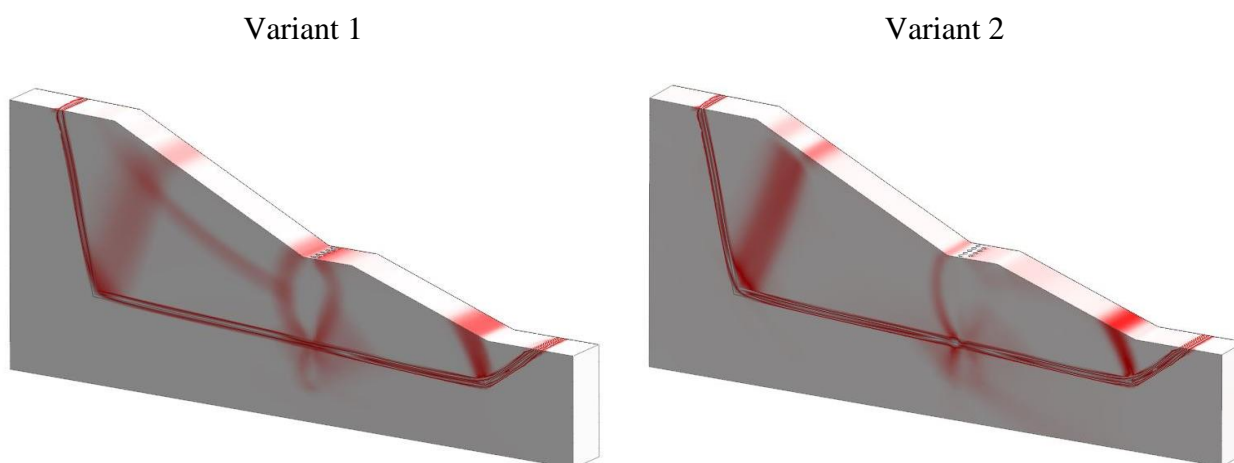


Fig. 6. Zones of maximum shearing strengths taking into account landslide prevention structures

Based on the results of preliminary calculations, it was found that the use of design of landslide prevention structure in the form of counterforts made of bored piles (variant 1) with the selected diameters and step of elements, allows to save on material up to 15.4%. Therefore, the use of the proposed design also allows to save on the volume of drilling operations.

Conclusions:

1. The choice of the type of retaining landslide prevention structures depends on engineering-geological and hydrogeological conditions, the topography of the slope, the kind and amount of the operating loads, the power of the shear rock mass, the significance and cost of objects to be protected and is performed on the basis of a technical and economic comparison of variants.

2. The use of retaining landslide prevention structures made of bored piles to stabilize landslide hazard and landslide slope is advisable when there is marked sliding surface and there is below the deformation zone of firm and stable grounds in which retaining elements can be laid.

3. The work presents a new design retaining anti-landslide structure with increased loadability and reduced consumption of materials has been proposed.

4. The design of landslide protection structure in the form of counterforts made of bored piles is intended for stabilize landslide hazard and landslide slopes as well as to increase stability of the slopes plots on which buildings and structures for various purposes are operated, reconstructed and built.

5. The step of the counterforts and the diameter of the bored piles that form them are determined depending on the value of the shear stress and the physical and mechanical properties of the grounds in the alignment of the structure, taking into account preventing ground penetration between the counterforts.

6. Based on the results of preliminary calculations, it was found that the use of design of landslide prevention structure in the form of counterforts made of bored piles with the selected diameters and step of elements, allows to save on material up to 15.4% in comparison with the design made in the form of two rows of bored piles.

7. The calculation methodology and recommendations for the design of landslide prevention structures in the form of counterforts made of bored piles can be developed after conducting experimental studies and numerical modeling of the interaction of elements of structure with the ground masses at different diameters and number of piles as well as the distance between the counterforts.

References

- [1] DBN V 1.1-46:2017. Inzhenernij zahist teritorij, budivel i sporud vid zsuiv ta obvaliv. Osnovni polozhennya. Kiyiv: Minregionbud Ukrayini, 2017.
- [2] A.Y. Byleush, *Opolzny y protyvoopolznievie meropryiatyia*. Naukova dumka. K., 2009.
- [3] H.D. Davidov, L.K. Hynzburh, "Ukreplenyie opolznevikh sklonov buronabyvnimy svaiamy", *Mekhanizatsyia stroitelstva*, vol. 9, pp. 13-15, 1969.
- [4] L.K. Hynzburh, *Protyvoopolznievie uderzhivaiushchye konstruksyy*. Stroyzdat. M., 1979.
- [5] R.L. Schuster, R.J. Krizek, *Landslides: analysis and control*. Published by National Academy of Sciences. Washington, 1978.
- [6] V.B. Shvets, V.Y. Feklyn, L.K. Hynzburh, *Usylenye y rekonstruktsyia fundamentov*. Stroyzdat. M., 1985.
- [7] S.Y. Matsyi, A.K. Riabukhyn, *Svaino-ankernie protyvoopolznievie konstruksyy: monografiya*. Krasnodar: KubHAU, 2017.
- [8] A. s. 1337482 SSSR, MPK E 02 D 29/02. Protivoopolznevoe sooruzhenye / K.Sh. Shadunts. № 3985629/29-33 ; zaiavl. 03.12.85 ; opubl. 15.09.87, Biul. № 34.
- [9] DSTU-N B V.1.1-37:2016. Nastanova shchodo inzhenernoho zakhystu terytorii, budivel i sporud vid zsuiv ta obvaliv. Kiyiv: DP «UkrNDNTS», 2016.
- [10] P.A. Konovalov, *Osnovaniya y fundamenti rekonstruyruemikh zdanyi*. Bumazhnaia halereia. M., 2000.
- [11] A. s. 1744202 SSSR, MPK E 02 D 29/02. Blok protyvoopolznevoho sooruzheniya / V.S. Khvan, O.Ya. Kylvander, A.T. Ribalka. № 4823886/33 ; zaiavl. 07.05.90 ; opubl. 30.06.92, Biul. № 24.
- [12] A. s. 1825846 SSSR, MPK E 02 D 29/02. Protivoopolznevoe sooruzhenye / V. S. Khvan, O. Ya. Kylvander. № 4908618/33 ; zaiavl. 07.02.91 ; opubl. 07.07.93, Biul. № 25.

ПРОТИЗСУВНА СПОРУДА У ВИГЛЯДІ КОНТРФОРСІВ З БУРОСІЧНИХ ПАЛЬ

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

¹Анісімов К.І., доцент,
anisimov@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-0447-3927

¹Бааджи В.Г., асистент,
baadzhi@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-6974-9082

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

Анотація. В даний час у світі спостерігається інтенсивна урбанізація, що характерна і для більшості регіонів України. Як наслідок, відбувається збільшення антропогенного навантаження на окремі території, через що особливу актуальність набула проблема розвитку таких явищ як зсуви. Зсуви є одним з найпоширеніших екзогенних геологічних процесів, які створюють екологічну та техногенну небезпеку. Причини їх активізації можна поділити на природні та техногенні. Зсувні процеси природного походження виникають, як правило, на морському узбережжі, на схилах річкових долин та в яружно-балкових мережах. Техногенні зсуви спостерігаються при будівництві, реконструкції та експлуатації будівель і споруд, що зводяться на ділянках схилів зі складними інженерно-геологічними умовами. З метою запобігання виникненню зсувів та пов'язаних з ними надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру необхідно здійснювати економічно та екологічно обґрунтовані протизсувні заходи перед початком господарського освоєння зсувних та зсувонебезпечних територій.

При будівництві на зсувних та зсувонебезпечних схилах або штучних укосах доводиться утримувати у стійкому стані великі масиви ґрунту. Виникнення і активізація зсувів веде до утворення неприпустимих деформацій, порушення стійкості схилу, а також руйнування будівель та споруд. Деформації будівель та споруд, що розташовані на схилах або біля них, відбуваються від таких зсувних процесів, які неможливо зупинити за допомогою звичайних протизсувних заходів. У цих випадках для захисту від утворення зсувів застосовуються утримуючі протизсувні конструкції з буронабивних паль, з закладенням в стійкі корінні породи та об'єднані залізобетонним ростверком. Такі споруди є одними з найбільш оптимальних, технологічних і економічно ефективних методів стабілізації зсувних зміщень. Вибір типу утримуючих протизсувних споруд і місця їх розташування на схилі залежить від величини зсувного тиску і його розподілу уздовж схилу, потужності зсувної товщі, конфігурації схилу, стану зсуву на момент будівництва та інших факторів.

В роботі проаналізовані основні з існуючих конструкцій поперечних та поздовжніх утримуючих протизсувних споруд пального типу, їх переваги і недоліки, умови застосування. В результаті цього, запропонована нова конструкція утримуючої протизсувної споруди підвищеної несучої здатності та зниженої матеріаломісткості. Протизсувна споруда виконана у вигляді паралельних довжині зсувного схилу контрфорсів, що утворені з круглих буросічних паль, діаметр яких збільшується в напрямку переміщення зсуву. При цьому палі закладені нижніми кінцями у стійкі ґрунти та об'єднані зверху залізобетонним ростверком змінної висоти, з похилом нижньої грані у бік подошви схилу. Ця конструкція призначена для стабілізації зсувонебезпечних та зсувних схилів, а також підвищення стійкості ділянок схилів, на яких експлуатуються, реконструюються та будуються будівлі і споруди різного призначення.

Ключові слова: схил, поверхня ковзання, протизсувна споруда, буросічні палі, контрфорс, ростверк, «стіна у ґрунті».

Стаття надійшла до редакції 27.10.2022

EVALUATION OF THE NEW CONSTRUCTIVE-TECHNOLOGICAL SOLUTION OF THE FENCE STRUCTURE IN THE NON-REMOVABLE FORMWORK

¹**Menelyuk O.I.**, Doctor of Engineering, Professor,
meneilyk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1007-309X

¹**Kyryliuk S.V.**, PhD.,
kirilstani@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8871-8302

¹**Bochevar K.I.**, postgraduate student,
4871416k@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4589-8080

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

Abstract. The known constructive and technological solutions of enclosing constructions of buildings in fixed formwork with the use of qualitative, quantitative and general analysis are analyzed. Selected quantitative indicators, such as wall thickness, weight of 1 m² of wall, heat transfer resistance, area of premises, cost, durability, tendency to shrinkage. Qualitative indicators were used: resistance to the sun, mold, fertilization and destruction, features of delivery of building materials.

The method of multicriteria analysis is used to evaluate new structural and technological solutions of fencing structures and determine the most effective technologies. Categories of various constructive-technological decisions in a fixed timbering on the basis of economic consideration of modeling are considered.

Such modern constructive-technological decisions of enclosing constructions in a fixed timbering are selected for comparison, as: expanded polystyrene blocks; blocks with wall alignment system; polystyrene concrete blocks; concrete blocks; blocks of cement-chip material; large panels made of expanded polystyrene; three-layer reinforced expanded polystyrene panels; cement particle boards; concrete slabs; frame-monolithic formwork with cement-chipboard cladding; frame-monolithic formwork with cladding of glass-magnesium plates and technology according to the patent UA 149402.

The new design and technological solution, which has been developed and patented, is a combination of modern materials that are of great interest and demand to consumers, such as light steel thin-walled structures and expanded polystyrene concrete.

The evaluation of technological solutions by quantitative criteria on a ten-point scale, where the minimum and maximum values are assigned points 1 and 10, respectively. Graphical modeling of the summary variants, which are equalized, is performed, and the corresponding diagrams are constructed.

Keywords: structural and technological solutions, enclosing structures, multicriteria analysis, non-removable formwork.

Introduction. Individual houses occupy the second line in the housing rating, primarily due to the competitive price and tangible advantages of such a purchase compared to apartments. Fundamental changes have taken place in the field of thermal protection of buildings over the past decades. With the update of normative documents on thermal insulation of buildings, the map of temperature zones of Ukraine has changed – the number of these zones has been reduced from 4 to 2. Thus, the indicators of the minimum permissible value of heat transfer resistance have increased. Therefore, there was a need to research new economical structural and technological solutions for erecting enclosing structures of low-rise buildings in fixed formwork with high thermal performance.

Energy efficiency in residential construction is a set of measures aimed at reducing the building's energy consumption. The solution to the task of choosing an economic variant of the structural-technological solution for erecting the enclosing structures of low-rise buildings in fixed formwork will help to saturate the housing market with the availability of budget cottages with high heat-technical characteristics.

One of such structural and technological solutions is frame construction in fixed formwork. Light steel thin-walled constructions and polystyrene foam concrete are of great interest and demand among consumers of construction products. However, in modern literature there are no recommendations for determining effective construction solutions for erecting buildings from polystyrene foam concrete in a fixed frame formwork. Completing the task of choosing an effective solution for the construction of buildings will allow solving the issues of modern construction, directly related to the problem of energy and resource conservation.

Analysis of research and publications. Low-rise buildings are becoming popular due to the following advantages:

– high speed of construction and minimization of risks, the house is built faster, because there is a small volume of work and a simplified registration procedure;

– ecology and comfort, low-rise buildings are mainly built far from industrial, urban areas, closer to nature and minimum noise;

– there is more free space near the house for recreation areas, for walks and games with children, there is an opportunity to arrange a terrace or an outdoor recreation area, your own flower bed, a small garden;

– increased privacy, life in a low-rise complex is confidential [1-4].

One of the ways to solve the housing problem is the active expansion of the construction of low-rise, quickly built energy-saving houses made of highly efficient modern building materials. For the quick construction of such housing, it is advisable to use light construction technologies that do not require heavy equipment and expensive mechanisms and devices. Fast construction will also be significantly facilitated by the dry construction method (without wet technological processes).

Significant savings on heating costs have always been a very important indicator when buying houses. Quickly constructed low-rise residential buildings (1-3 floors) can be divided into frame (with a metal or wooden frame), frame-panel, panel and modular. It is worth noting that the construction of such buildings, in addition to speed and cost savings, prioritizes the environmental friendliness of buildings and the health of their residents [2].

Economic affordability is the ability to freely choose and buy housing that is affordable and inexpensive to operate; the ability to renew, characterized by flexible planning solutions that allow for economically rational reconstruction and modernization, due to which the service life of the house is significantly extended; compliance with market requirements by satisfying people's needs, taking into account changes in demographic conditions and purchasing habits of the population [3]. Especially in low-rise construction, non-removable formwork is used for enclosing structures [4-10].

Purpose and tasks. To analyze the known constructive and technological solutions of enclosing structures of buildings in fixed formwork. Compare known solutions with the developed new solution using multi-criteria analysis and determine the most effective of them.

Research materials and methodology. Modern structural and technological solutions of enclosing structures in fixed formwork [4-10] and the developed solution [11] are presented in the form of a classification (Fig. 1).

From them, 12 technologies for erecting fencing structures in fixed formwork were selected for comparison, namely:

1. Styrofoam blocks.
2. Styrofoam blocks with wall leveling system.
3. Blocks made of polystyrene concrete.
4. Concrete blocks.
5. Blocks made of cement-chip material with foam polystyrene inserts.
6. Large-sized polystyrene foam panels.
7. Three-layer reinforced polystyrene panels.
8. Cement chipboards.
9. Concrete slabs with a decorative coating.
10. Frame-monolithic formwork with cladding with cement chipboards.
11. Frame-monolithic formwork with cladding of glass-magnesium plates.
12. Constructive and technological solution according to the patent [11].

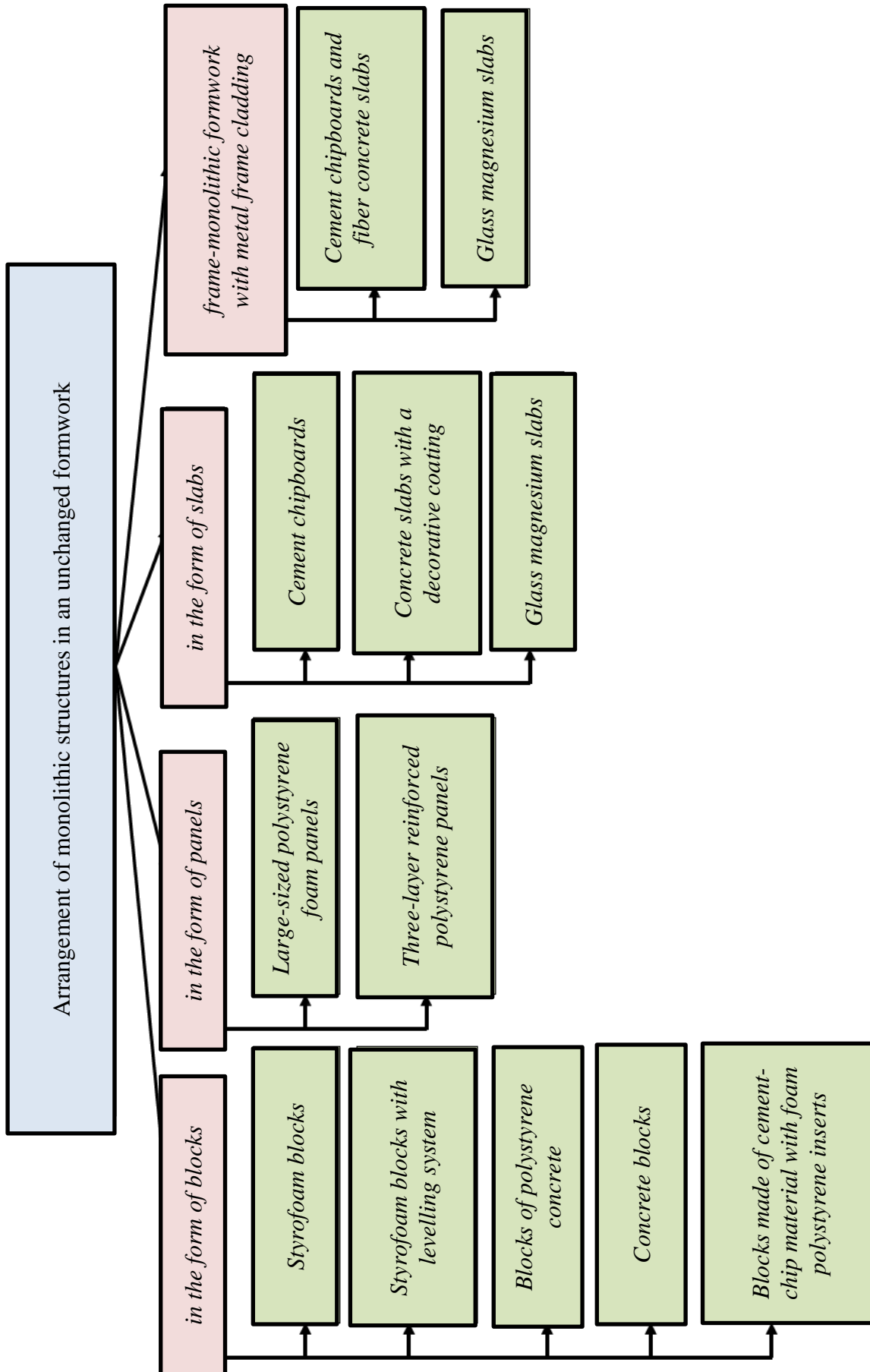


Fig. 1. Classification of monolithic structural and technological solutions in fixed formwork

The peculiarity of the developed solution is the installation, which is carried out easily and quickly, allowing to shorten the construction period, excluding the use of special machinery and equipment, which allows to reduce the cost of construction. Also, the cost of transportation of frame elements is reduced due to the lightness of structures and the linear shape of LSTS parts (light steel thin-walled structures) in comparison with traditional fittings, which enables compact packaging. Thanks to the LSTS frame, high stability is ensured not only during the pouring of polystyrene foam concrete, but also during further work.

Polystyrene concrete acts as an effective heat-insulating material. This is a light version of the traditional classic cement mortar, in which the heavy sand filler is replaced by a light polymer, as a result of which not only the weight of concrete structures is significantly lightened, but also an excellent thermal insulation material is created. It has high heat (depending on the brand of the mixture, λ is from 0.052 to 0.1 W/Mk) and sound insulation (at 500 Hz and a thickness of 5 cm is 13 dB) properties and sufficient vapor permeability (μ 8.5).

Due to the specially selected composition and physical properties of the polystyrene foam concrete mixture, namely plasticity, it is possible to concrete the wall structure for the entire floor at once, without additional technological operations to compact the concrete mixture, and the frame made of LSTS profiles prevents the expansion of the fixed formwork made of cement chipboards. Such a wall structure has the possibility of using various types and methods of finishing, from plaster to a hinged facade.

When choosing, the requirements of regulatory documents and the popularity of technologies among the population were taken into account. In order to make the optimal decision regarding the choice of structural and technological solutions of fixed formwork, it is first important to determine which characteristics will be the main ones. They can be economic, technical, environmental, social or other.

The proposed system of multi-criteria analysis for evaluating structural and technological solutions allows to characterize not only quantitative but also qualitative parameters. That is, a distinctive feature of multi-criteria analysis is the presence of several groups of criteria, each of which allows to describe in sufficient detail a specific structural and technological solution of fixed formwork, analyzing information sources.

Selection criteria can be: manufacturability, cost and construction time. Factors such as thermal insulation properties, resistance to external weather factors, reliability, durability, environmental friendliness, speed of construction, strength and weight characteristics of materials and the finished structure play an important role in this complex selection process. An equally important indicator before the construction of the object is the determination of the cost per square meter of the selected structural and technological solution of the fencing structures.

Based on the search for relevant information about the selected structural and technological solutions and for choosing the most effective of them, the following most significant evaluation criteria were adopted:

Quantitative:

- thickness of all layers of the structural and technological solution, taking into account heat transfer resistance, mm;
- the mass of all layers of the structural and technological solution 1 m², kg;
- the area of the premises, which is formed when the external dimensions of the buildings are 10 m wide and long, m²;
- the cost of a constructive and technological solution;
- durability according to regulatory documents and literary sources, years;
- probability of shrinkage according to regulatory documents and literary sources, %.

Qualitative:

- prevention of decay and destruction.

Based on the analysis of information sources [1-10] and calculations of heat transfer resistance [12, 13], the thickness of enclosing structures, cost estimates of the cost of 1m² of erecting enclosing structures, a comparison table of structural and technological solutions according to the selected criteria was compiled. Quantitative evaluations of the criteria are given from real-time measuring devices into a single point scale. The evaluation of technologies according to quantitative criteria was carried out on a ten-point scale, in which 1 point is the minimum, and 10 is the maximum value, respectively. The rest of the points are obtained by interpolation.

Structural and technological solutions of fencing structures in fixed formwork, criteria and points assigned to them are presented in the Table. 1.

Table 1 – Criteria and points assigned to them of structural and technological solutions that are compared

| No. | Evaluation criteria | | Thickness, mm / in points | Heat transfer resistance, m ² ·S/W / in points | Weight 1 m ² of a wall, kg/in points | Area of premises, m ² /in points | Price, UAH/m ² in points | Durability, years/in points | Shrinkage, %/ mm/m | Prevents decay and destruction |
|-----|---|--|---------------------------|---|---|---|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|
| | Construction technologies | | | | | | | | | |
| 1 | Fixed formwork "Thermodim, Legodim, Izodim" | | 340/7 | 3.2/10 | 386/5 | 86.9/9 | 2 725/9 | 100/8 | 1/9 | Stand |
| 2 | Styrofoam blocks with wall leveling system | | 345/7 | 3.2/10 | 395/5 | 86.8/9 | 2 760/9 | 100/8 | 1/9 | Stand |
| 3 | Formwork from polystyrene concrete blocks | | 500/9 | 3.1/9 | 400/5 | 81/9 | 2 422/10 | 100/8 | 2/8 | Stand |
| 4 | Formwork from cement-chip blocks | | 520/9 | 3.1/9 | 420/5 | 80.5/9 | 2 380/10 | 100/8 | 2/8 | Stand |
| 5 | Movable modular formwork of the "TIBE" type | | 400/8 | 2.8/8 | 420/4 | 84.6/9 | 3230/9 | 100/8 | 1/9 | Stand |
| 6 | Fixed formwork "Plastbau" | | 320/6 | 3.2/10 | 390/5 | 87.6/9 | 2 814/9 | 100/8 | 1/9 | Stand |
| 7 | Fixed formwork "SOTA, 3-D reinforced panel" | | 550/9 | 3.2/10 | 300/6 | 80.2/9 | 3 553/9 | 100/8 | 1/9 | Stand |
| 8 | Formwork from cement chipboards | | 640/10 | 3.0/9 | 560/2 | 76/8 | 3085/7 | 100/8 | 2/8 | Stand |
| 9 | Fixed formwork "Technoblock" | | 350/7 | 3.3/10 | 465/4 | 86.5/9 | 3 738 /8 | 80/6 | 1/9 | Processiong |
| 10 | Frame-monolithic formwork with CSP cladding | | 540/9 | 3.0/9 | 580/2 | 76/8 | 4 627/7 | 100/8 | 2/8 | Stand |
| 11 | Frame-monolithic formwork with glass magnesite cladding | | 540/9 | 3.0/9 | 580/2 | 76/8 | 4 730/7 | 100/8 | 2/8 | Stand |
| 12 | Patent UA No. 149402 "Wall of a building" | | 330/6 | 3.1/9 | 390/5 | 87.1/9 | 2 445/10 | 100/8 | 1/9 | Stand |

The criteria for choosing a structural and technological solution for enclosing structures in fixed formwork are indicators that most completely and objectively evaluate its leading characteristics. They include a multi-level approach to ensure the solution of numerous problems: technical, technological, operational, economic and environmental.

A "summary chart" created using Microsoft Excel was used to process multi-criteria analysis scores. This diagram is formed on the basis of a "summary table" (Table 1) for analysis, study, generalization and summarization of data from external sources. First, a summary diagram was created, which groups the values of the quantitative criteria of all structural and technological solutions (Fig. 2).

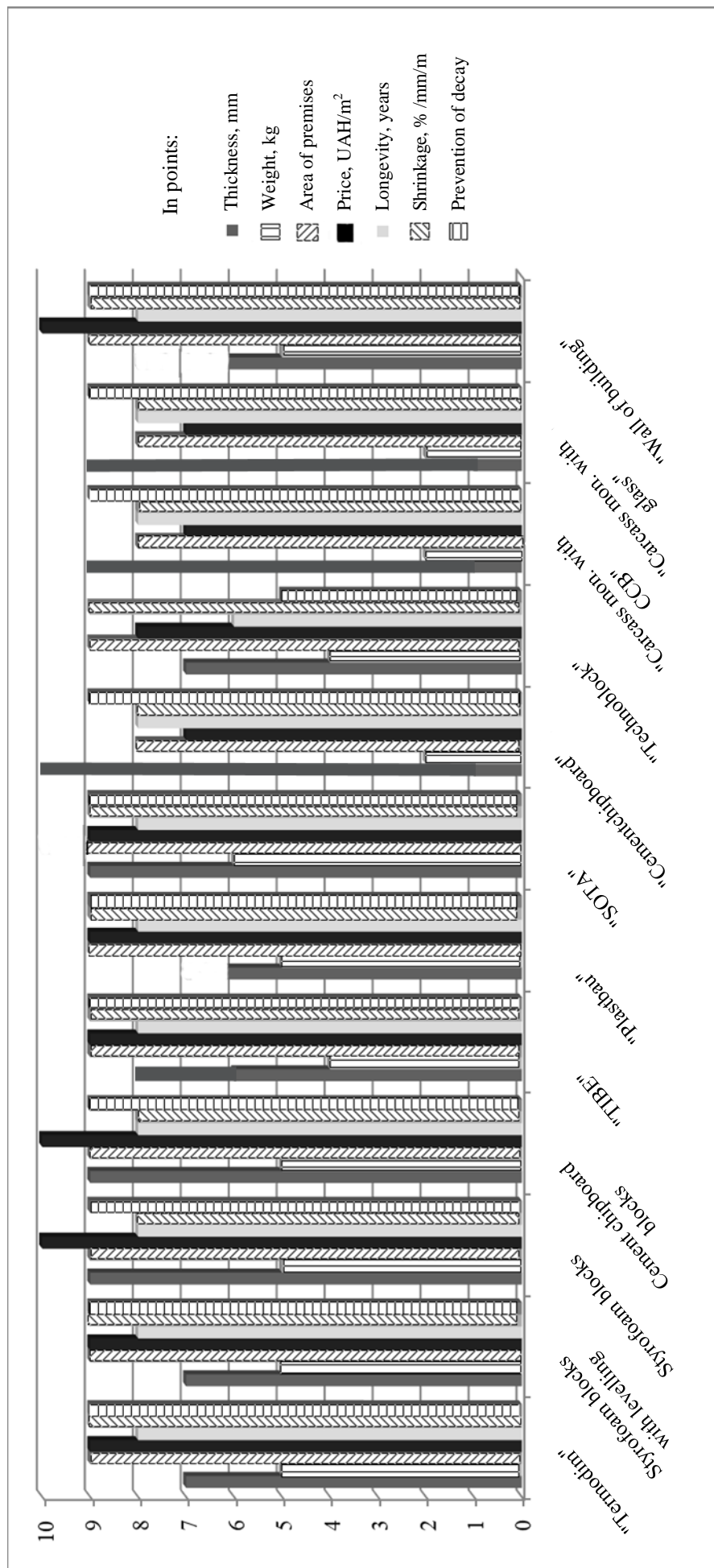


Fig. 2. Comparison of structural and technological solutions by points in the summary diagram

Analyzing the consolidated table (Table 1) of the selected structural and technological solutions, it can be seen that such a criterion as heat transfer resistance may not be considered in the future, because it corresponds to the normative value established for the II temperature zone $R_{qmin}= 2,8 \text{ m}^2 \cdot \text{S/W}$, in all cases. The rest of the criteria are important when choosing a structural and technological solution for the enclosing structures of buildings in fixed formwork and were used in the subsequent comparison.

Considering the selected structural and technological solutions in the consolidated table (Table 1) and the consolidated diagram (Fig. 2), we can say that the most ineffective solution is cement chipboard with a wall thickness of 640 mm and a weight of 560 kg/m^2 .

One of the main criteria is the mass of materials, which affects the cost of their delivery and the need to use additional equipment for unloading at the construction site. Also, such structural and technological solutions in fixed formwork have an additional load on the foundation.

An important advantage of modern houses is a significant increase in the usable area of the house due to a noticeable decrease in the thickness of the load-bearing walls. This advantage is especially noticeable during private construction, when the cost of the land plot is quite high. According to these criteria, in the future, we will not use constructive solution 8 "Cement chipboards" (Table 1) for selection. The rest of the structural and technological decisions in the fixed formwork are taken for further analysis with the help of summary diagrams.

The criterion of durability is the leading parameter of structural and technological solutions, which affects the quality of load-bearing structural elements (foundation and walls). During the entire life of the building, they are subject to maintenance and repair. The periodicity of these works depends on the durability of the materials from which the building structures are made, the impact of the environment and other factors.

Grouped constructive and technological solutions according to the qualitative criterion of preventing decay and destruction and comparing their technological indicators according to durability (Fig. 3), evaluated in points.

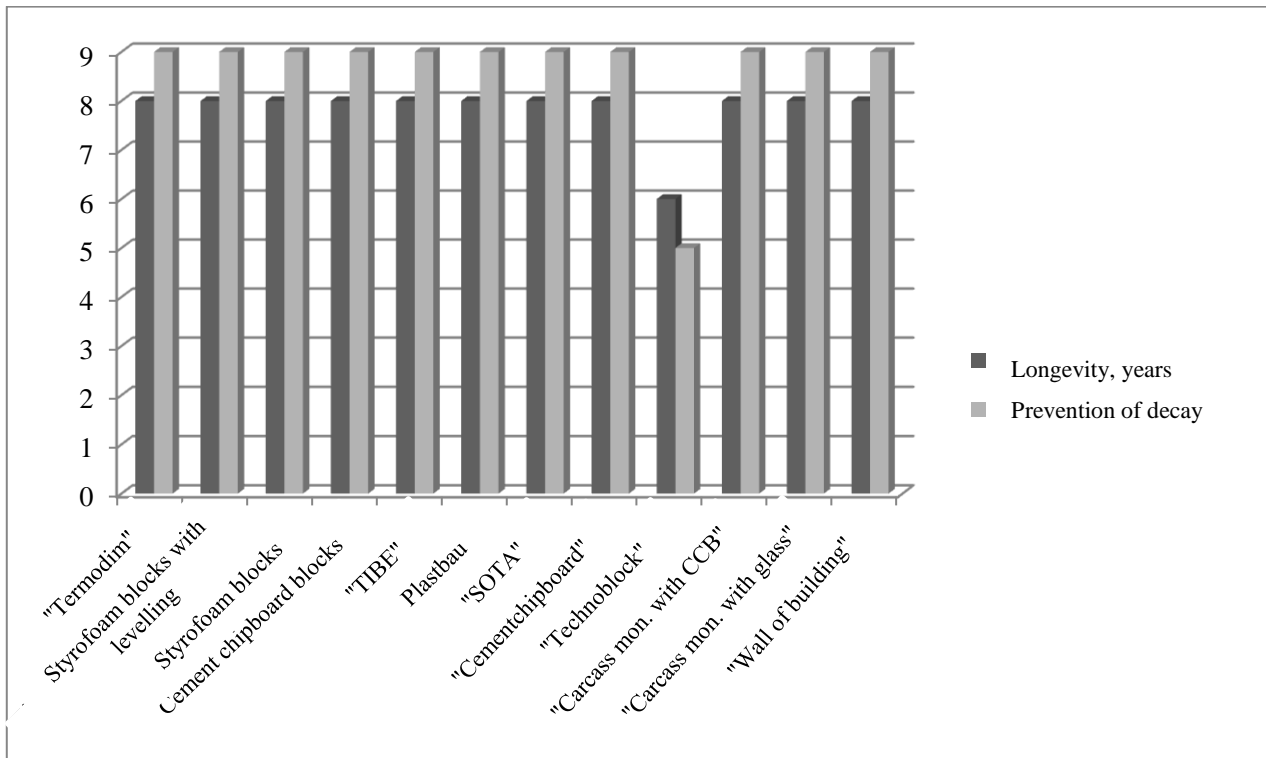


Fig. 3. Diagram of comparison of structural and technological solutions according to the criteria of durability and resistance to decay and destruction

Looking at the comparison diagram of structural and technological solutions according to the criterion of durability (Fig. 3), it is obvious that the non-removable formwork Technoblok has the lowest operational qualities. In the constructive and technological solution, Technoblok uses moisture-resistant plywood as one of the internal structural elements, which requires one-time treatment of the material with special mixtures (due to its physical properties), which reduces its service life. In addition, the cost of 1m² of wall according to this solution is UAH 3.738, which, compared to other options, is more than average. Therefore, constructive solution 9 (Table 1) was not taken into account in the future.

The rest of the structural and technological solutions are grouped according to the criteria of thickness and weight of the options, which respectively affect the choice of the foundation base (Fig. 4).

Analyzing the resulting diagram (Fig. 4), it can be seen that polystyrene concrete blocks, blocks made of cement-tape material, fixed formwork "SOTA", cement-chipboards and frame-monolithic formwork have a significant thickness of the finished wall structure. Therefore, solutions 3, 4, 7, 8, 10, 11 will not be taken into account in the future (Table 1).

The main of the selected criteria is the cost per 1 m² of the fencing structure, then we will consider the rest of the solutions according to this criterion (Fig. 5).

The diagram (Fig. 5) shows that the most expensive solutions among structural and technological solutions in fixed formwork are the following options: polystyrene blocks, TIBE and "Plastbau". Therefore, 12 solutions remain (Table 1).

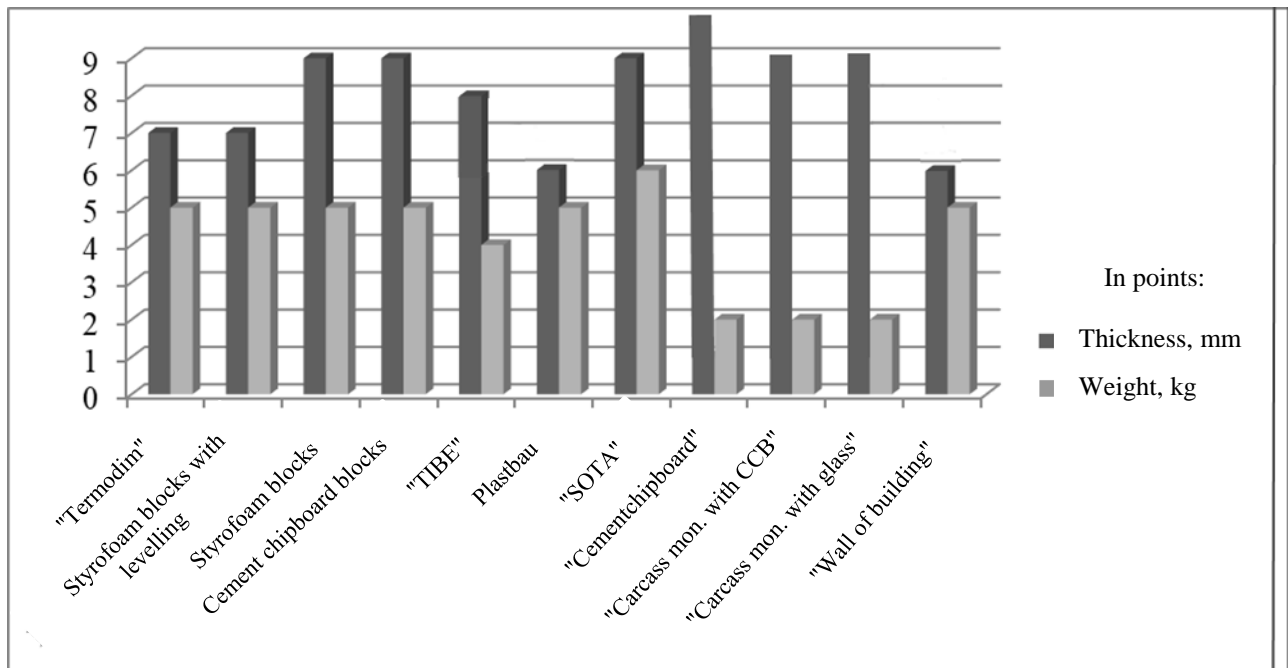


Fig. 4. Comparison diagram of structural and technological solutions in fixed formwork according to the criteria of their mass and thickness

According to the results of a comparative analysis of the structural and technological solutions of the enclosing structures of buildings in fixed formwork, the most effective is the solution according to the UA patent No. 149402 "Wall of the building" [11] with the following indicators: the cost of erecting 1 m² of the enclosing structure is UAH 2.445. The thickness is 330 mm and the weight is 390 kg, which provides 11% more usable area of internal premises compared to fixed formwork from blocks, with building dimensions of 10×10 m and a weight reduction of more than 1.5 times compared to frame-monolithic options. The heat transfer resistance is provided at the level of 3.1 m²·C/W, which is higher than the normatively established 2.8 m²·C/W for the II climate zone. Also, one of the advantages of the developed solution is the possibility of carrying out construction work at any time of the year, ensuring resistance to moisture, mold and fungal damage to the walls.

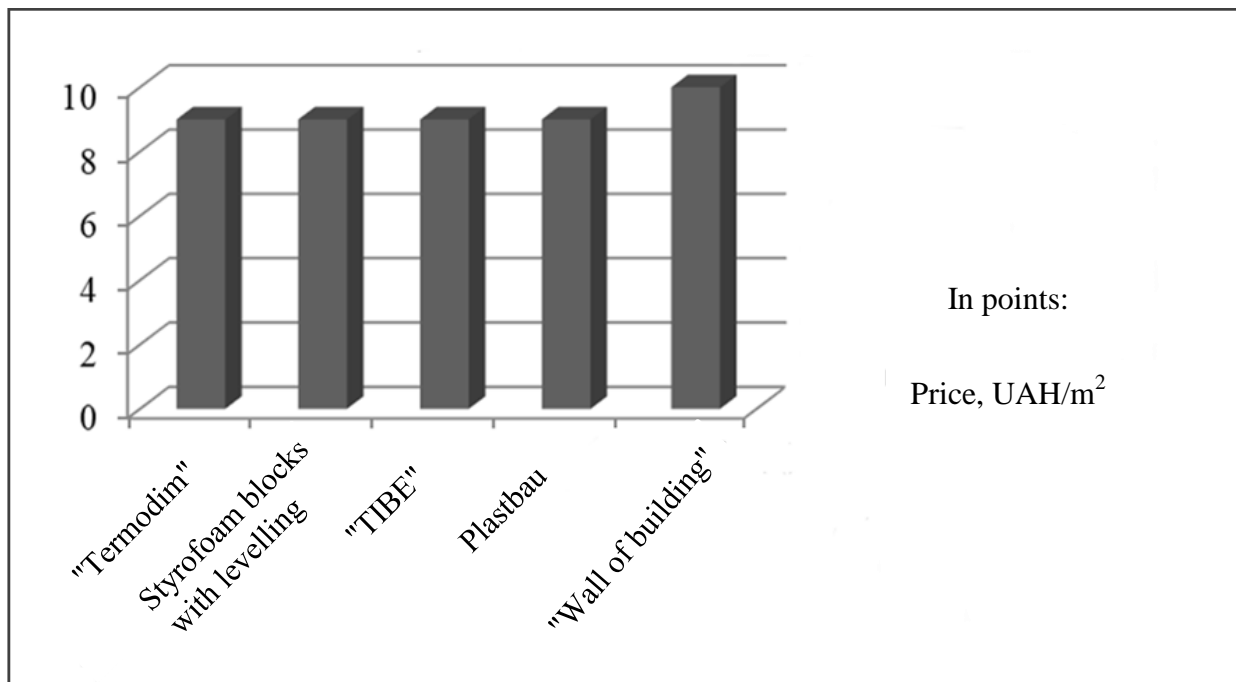


Fig. 5. Diagram of comparison of structural and technological solutions according to the cost criterion

For further research, a decision was made according to the patent [11], which provides not only heat-technical characteristics, but also economic ones.

Summary:

1. Comparison of the patented solution with 11 known solutions based on 8 criteria using Excel's "pivot tables and charts" tools, showing its advantages.
2. In order to further conduct the research, a solution developed under the UA patent No. 149402 "Wall of the building" was adopted.

References

- [1] I.V. Tsypryanovych, O.Y. Starchenko, D.V. Hulin, S.V. Klymenko, *Budivnytstvo malopoverkhovykh shvydkosporudzhuvanykh, enerhozberihaiuchykh zhytlovykh budynkiv iz SIP-panelei* : navchalnyi posibnyk dlia zdobuvachiv profesiinoi (profesiino-tekhnichnoi) osvity. Chernivtsi, Bukrek, 2021.
- [2] A. Meneiliuk, S. Kyryliuk, L. Cherepashchuk, "Development of cost-effective enclosing structures with high heat transfer resistance", *Ural Environmental Science Forum "Sustainable Development of Industrial Region, E3S Web of Conferences*, vol. 258, 09040, 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125809040>.
- [3] Perspektivy malopoverkhovykh zhytlovykh budynkiv. [Online]. Available: <https://dom.ria.com/uk/articles/perspektivy-maloetazhnykh-zhilykh-domov-252584.html>. Accessed on: June 22, 2022.
- [4] L.A. Cherepashchuk, "Zvedennia malopoverkhovykh budivel z enerhoefektyvnymy ohorodzhuvalnymy konstruktsiiamy", avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya k-ta tekhn. nauk: 05.23.08, Odes'ka derzhavna akademiya budivnictva ta arhitekturi. Odessa, 2018.
- [5] A.Y. Meneiliuk, T.M. Dubelt, Y.A. Meneiliuk, *Ynnovatsyy v stroytelstve y rekonstruktsyy K.:TOV NVP «Interservis»*, 2018.
- [6] Malopoverkhovi zabudovy yevropeiskoho typu. [Online]. Available: <https://versii.if.ua/novunu/malopoverhovi-zabudovy-yevropejskogo-typu-v-ivano-frankivsku-yak-mify-peretvoryuyutsya-v-realnist/> Accessed on: June 24, 2022.
- [7] Tekhnolohii malopoverkhovoho budivnytstva. [Online]. Available: <https://jak.koshachek.com/articles/tehnologii-malopoverhovogo-budivnictva.html> Accessed on: June 24, 2022.

- [8] K.V. Spirande, Y.V. Bondarenko, M.V. Iakymenko, R.M. Shemet, V.V. Bielka, "Design features of low-rise buildings walls erected from permanent formwork ComBlock units", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 907(1), 012025, 2020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012025>.
- [9] J.H. Advincula, D.G.C. Cuevas, A.D.A. Dela Cruz, J.P.D. Carreon, "Structural characterization of foamed composite structural insulated panel with coir for load bearing wall application", *Materials Science Forum 934 MSF*, 2018, pp. 222-226. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.934.222>.
- [10] G. Zhang, Q. Fan, Z. Lu, D. Qiao, "Seismic Performance of M-Section Cold-Formed Thin-Walled Steel-Reinforced Concrete Wall", *Journal of Structural Engineering (United States)*, 48(9), 04022144, 2022. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0003453>.
- [11] Stina budivli : pat. UA 149402 Ukraina; zaiavl. 02.02.2021 ; opubl. 17.11.2021, Biul. № 46.
- [12] DBN V.2.6- 31:2016. Teplova izoliatsiia budivel. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2017.
- [13] DSTU-N B V.2.6-101:2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Metod vyznachennia oporu teploperedachi ohorodzhuvalnykh konstruktsii. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2010.

ОЦІНКА НОВОГО КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО РІШЕННЯ ОГОРОДЖУВАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ В НЕЗНІМНІЙ ОПАЛУБЦІ

¹Менейлюк О.І., д.т.н., професор,
meneilyk@gmail.com, RCID: 0000-0002-1007-309X

¹Кирилюк С.В., к.т.н.,
kirilstani@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8871-8302

¹Бочевар К.І., аспірант,
4871416k@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4589-8080

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

Анотація. Проаналізовані відомі конструктивно-технологічні рішення огорожувальних конструкцій будівель в незнімній опалубці з використанням якісного, кількісного та загального аналізу. Вибрані кількісні показники, такі як товщина стін, вага 1 м² стіни, опір теплопередачі, площа приміщень, вартість, довговічність, схильність до усадки. Використовувалися якісні показники: стійкість до сонця, плісняви, гноювання та руйнування, особливості доставки будівельних матеріалів.

Використаний метод багатокритеріального аналізу для оцінки нового конструктивно-технологічного рішення огорожувальних конструкцій та визначення найбільш ефективних технологій. Розглянуті категорії різних конструктивно-технологічних рішень в незнімній опалубці на основі економічного розгляду моделювання.

Підібрано для зрівняння такі сучасні конструктивно-технологічні рішення огорожувальних конструкцій в незнімній опалубці, як: пінолестирольні блоки; блоки з системою вирівнювання стін; блоки з полістиролбетону; бетонні блоки; блоки з цементно-стружкового матеріалу; великорозмірні панелі з пінополістиролу; тришарові армовані пінополістирольні панелі; цементно-стружкові плити; бетонні плити; каркасно-монолітна опалубка з обшивкою цементно-стружковими плитами; каркасно-монолітна опалубка з обшивкою скломангнієвими плитами та технологія за патентом UA 149402.

Нове конструктивно-технологічне рішення, яке розроблено та запатентовано, є поєднанням сучасним матеріалів, які викликають великий інтерес і затребуваність у споживачів, такі як легкі сталеві тонкостінні конструкції та пінополістиролбетон.

Проведена оцінка технологічних рішень за кількісними критеріями за десятибальною шкалою, в якій за мінімальне значення присвоєно 1 бал та за максимальне значення – 10 балів. Виконано графічне моделювання варіантів зведення, які зрівнюються, та побудовані відповідні діаграми.

Ключові слова: конструктивно-технологічні рішення, огорожувальні конструкції, багатокритеріальний аналіз, незнімна опалубка.

Стаття надійшла до редакції 23.11.2022

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 цілей 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 7-10 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. Анотація вирівнюється по ширині сторінки та пишеться обсягом **не менше 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 введення, ціль, 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 спирається автор;

– виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття;

– постановка завдання (формулювання мети 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.

– *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 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.

Орієнтована вартість 1 сторінки 50 грн. Точна вартість буде вказана після прийняття статті до друку. 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 103204780000026009924861812** 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 № 2
грудень 2022**

Головний редактор *Вировой В.М.*

Технічний редактор *Антонюк Н.Р.*

Підписано до друку 04.01.2023 р.
Формат 60×84/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Цифровий друк. Ум.-друк. арк. 14,5.
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