

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 № 1
вересень 2022**

ОДЕСА 2022

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

Випуск № 1, вересень 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);

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Технічна редакція:

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

Рекомендовано до видання Вченою радою ОДАБА

Протокол № 2 від 29.09.2022 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 № 1
September 2022**

ODESSA 2022

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

Issue № 1, September 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 № 2, 29 September, 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

Ширяєв Т.В. Еволюція формування забудови готельних ділянок в містах західної Європи XVIII – початку XX ст.....	7
--	---

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

Бутенко С.В., Плахотнікова І.А., Колесніков С.М. Формула повної діаграми напруження-деформація для стиску бетону в умовах пожежі та при високих температурах.....	18
Дауров М.К., Білик А.С. Порівняння роботи багатоповерхових сталевих каркасів при пожежі за різних початкових умов та їх вплив на живучість.....	27

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

Барабаш І.В., Щербина О.С. Дисперсно-армований литий керамзитобетон на механоактивованому шлакопортландцементі.....	44
Гедулян С.І., Гара О.А., Савченко С.В. Порівняльний аналіз використання розширювальних агентів у ремонтних розчинах з сухих будівельних сумішей для покращення умов твердіння.....	55
Ласлов С.В. Методика експериментальних досліджень шумового забруднення від автомобільного транспорту та акустичних параметрів шумозахисних екранів.....	63
Невинський О.Г., Чвир В.А. Композити на основі вторинної полівінілхлоридної сировини та відходів деревини.....	70
Хлицов М.В., Бачинський В.В., Шкурпіт О.М., Кондратенко О.І. Аналіз факторів, які впливають на властивості надрукованого виробу за допомогою 3d-принтера.....	77

ГІДРОТЕХНІЧНЕ ТА ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Рогачко С.І. Захист морських каналів від наносів.....	85
---	----

ІНЖЕНЕРНІ МЕРЕЖІ ТА ОБЛАДНАННЯ

Петраш В.Д., Басист Д.В., Гераскіна Е.А., Даниченко М.В., Шевченко Л.Ф. Оцінка взаємозв'язку гідравлічної та теплової стійкості в системах опалення висотних будівель.....	94
Прогульний В.Й., Грачов І.А. Пористі дренажі контактних освітлювачів.....	101

ОСНОВИ ТА ФУНДАМЕНТИ

Осадчий В.С., Бааджи В.Г. Оцінка стійкості ділянки схилу Одеського узбережжя.....	108
Вимоги до оформлення статей у збірнику Сучасне будівництво та архітектура.....	117

CONTENTS

ARCHITECTURE

- Shyriaiev T.V.**
Evolution of formation of hotel areas in the cities of western Europe XVIII – early XX centuries.. 7

BUILDING STRUCTURES

- Butenko S.V., Plahotnikova I.A., Kolesnikov S.M.**
The formula for the complete stress-strain diagram for compressive concrete under fire and high temperature conditions..... 18
- Daurov M.K., Bilyk A.S.**
Multi-storey steel frames in fire stress state comparison of under different initial conditions and their influence on vitality..... 27

BUILDING MATERIALS AND TECHNIQUES

- Barabash I.V., Shcherbyna O.S.**
The influence of basalt fiber on the properties of claydate-concrete..... 44
- Hedulian S.I., Gara O.A., Savchenko S.V.**
Comparative analysis of the use of expansion agents in repair solutions of dry building mixtures for improving hardening conditions..... 55
- Laslov S.**
Methods of experimental research of noise pollution from road transport and acoustic parameters of noise protection screens..... 63
- Nevinsky A.G., Chvyr V.A.**
Composites based on secondary polyvinyl chloride raw and wood waste..... 70
- Khlytsov N.V., Bachinsky V.V., Shkurpit O.M., Kondratenko O.I.**
Analysis of factors affecting properties of a printed product using a 3d printer..... 77

HYDROTECHNICAL AND TRANSPORT CONSTRUCTION

- Rogachko S.I.**
Protection of sea channels from sediments..... 85

UTILITY NETWORKS AND FACILITIES

- Petrash V.D., Bassist D.V., Ph.D., Geraskina E.A., Danichenko N.V., Shevchenko L.F.**
Evaluation of the interrelation of hydraulic and thermal resistance of water heating systems... 94
- Progulny V., Grachov I.**
Porous drainages for contact clarifiers..... 101

BASEMENT AND FOUNDATIONS

- Osadchy V.S., Baadzhi V.G.**
Assessment of the stability of the slope section of the Odessa coast..... 108
- Requirements for the articles formation in collection Modern construction and architecture** 117

EVOLUTION OF FORMATION OF HOTEL AREAS IN THE CITIES OF WESTERN EUROPE XVIII - EARLY XX CENTURIES**Shyriaiev T.V., PhD.,**

shyryaev.tv73@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8412-9017

National Academy of Fine Arts and Architecture

str. Voznesenskiy spusk, 20, Kyiv, 04053, Ukraine

Abstract. In the research, the urban development aspect of hotel areas in the context of severe urban changes that took place in the cities of Western Europe during the XVIII - early XX centuries were analyzed. It was investigated how due to external factors of influence new composite forms of the location of hotels in urban areas were formed and more modern algorithms of interaction between current urban planning realities and the formation of new, improved functional and planning proposals in the design, construction and operation of European hotels were formed in the second half of the XIX – early XX century.

The scale of evolutionary changes has been constructed during this historical period and the main stages of the formation of the hotel industry in Europe have been studied. Four main compositional variants of urban areas were discovered, in which the hotels of that time were built: the frontal site, through the section, located on the corner and the hotel quarter. The prevailing forms of the location of hotels in these areas in the urban environment were analyzed, as well as the external factors of influence not only on the change of the urban construction concept were investigated, but also on the emergence of new architectural and planning decisions, which in their basic structure have survived to this day almost unchanged.

Among the main features of the development of urban development, it should be noted the active development of the area of the former economic yard, which functionally began to be used directly by the hotel itself. This philosophy of increasing the room number and profitability of the institution has led to a gradual complication of the composite component and to the complete development of the hotel area with the selection of one or more internal atriums that were involved in separate public spaces and hotel areas.

Keywords: hotel, city, Europe, composition, location, land plot, hippodamus system, inner space, household yard.

Problem statement. One of the most important issues of contemporary architecture is its frivolous attitude towards past events, historical background and information acquired throughout centuries. Such a suspension is destructive since it ignores the peculiar algorithm for solving previously stated problems. Therefore, it is important to conduct a comprehensive analysis of historical approaches towards the way urban infrastructure was forming and developing in order to find and prevent recurrent mistakes in present and future as well as discover possible ways to deal with urban transformations. This aspect is particularly relevant when designing new or renovating existing hotels in historical areas of a city, where steady urban structure, at the request of time, changes or transforms its purpose. The examples given in this research vividly demonstrate various ways of hotel plots development in urban environment and define specific features for each compositional scheme.

Research purpose. Defining evolutionary changes in hotel construction from the point of urban planning and revealing prevalent tendencies in compositional solutions towards locating hotels in urban environment in 18th – early 20th centuries. Investigating external factors of influence on European hotels' compositional structure.

Novelty of the research. The article is dedicated to the theme that has not yet received scientific attention and has not been the research subject in works of Ukrainian scientists. It remains unexplored from the point of analyzing European historical experience in hotel construction and its extrapolation to the contemporary design principles in historical areas of Ukrainian cities. This is the first time to

define prevailing master planning principles for hotel construction in urban areas in late 18th – 20th centuries, and investigate external influences affecting urban planning component of hotel construction in Europe in the 19th century.

Latest research and publications analysis. Hotel construction and renovation in historical city environment has been researched in greater detail in N. Merzhiievska [1] and O. Rohozhnikova [2] dissertations. Both of the works are dedicated to adaptation of historical buildings to contemporary hotel infrastructure in the conditions of reconstruction of Ukraine's historical cities. Among the latest scientific studies covering the formation of modern hotel and public infrastructure in the context of historical quarters' reconstruction the following researchers should be highlighted: L. Bridni [3], N. Vatamaniuk [4], N. Merzhiievskoi [5, 6], V. Kyseleva [7], and others.

Despite the fact that the number of works covering the latest methods of hotel design is constantly growing, the architectural and historical component of the hotel industry formation remains mostly unexplored. In particular, no thematically related to the presented material works have been found among contemporary Ukrainian scientific studies. That is why the article is based solely on analysis of archival sources dating from second half of 19th – early 20th centuries. The most remarkable of those are works of German and Austrian architects-theorists Damm-Etienne P. [8], Klasen L. [9, 10], Kunz F. [11], Gluksmann P. [12], Wohler M. [13], Durn J. [14]. Besides investigating architectural and planning structure, the works also reveal specific compositional approaches of locating hotels in urban areas. Materials from the architectural encyclopedia of the famous Russian architect, civil engineer and publisher G. Baranovskiy [15] were used for visual-comparative analysis.

Research methods. The article is based on the historical-genetic method, implemented to trace cause-and-effect links between various stages of urban component of the hotel industry formation and development in the 19th century Europe. Applying comprehensive analysis, the subject of the research has been defined as well as the reasons for transformation in hotel planning structure during the 19th – early 20th centuries. The typological method was applied in order to reveal urbanistic and planning features, which allowed not only to analyze general compositional schemes implemented into site development but also to figure out how these transformations influenced hotels' functional structure.

Research objectives:

- Distinguishing prevailing compositional schemes in urban site development for hotel construction in the 19th – early 20th centuries.
- Investigating urban challenges in European city development in the 19th – early 20th centuries, which, alongside other influential factors, were generating new urban compositional requirements for hotel construction in urban areas and creating new compositional approaches in urban planning.
- Defining the most significant transformations that caused revolutionary modifications in European and North American hotel industry.

Statement of the basic material. The late 18th century Industrial Revolution contributed to society's rapid economic development, which affected not only swift industrialization process and active growth of urban population, but also completely changed stable urban situation that prevailed in European cities during the 17th – 18th centuries. New factors of influence emerged: building density, high fiscal charges, and increase in land plots' value. This encouraged the search of new development methods.

Previously to the 18th century the global population placement approach subordinated to pre-industrial society's principles. The majority of the population was involved into agricultural sector and small-scale handicrafts. Underdeveloped transport infrastructure also did not contribute to comfortable long-distance traveling, so the general concept of travelling (commercial travel and religious pilgrimages) hardly changed since the Middle Ages. On this historical stage, European cities were mostly quite small, and therefore no extensive network of urban hotel infrastructure existed.

Places, in which a traveler could take shelter for a night, were located on city outskirts and these were mostly just taverns or inns with rooms to stay. Compositional structure of these sites mostly implied free planning since construction sites on the outskirts were not significantly regulated. City facilities with a hotel function looked rather like small furnished rooms or houses for pilgrims at large churches and monasteries. There were only a few rooms rented out to tenants and no necessary typological premises for servicing travelers.

Frontal plot. Reconstruction of old medieval areas in European cities in the first half of the 18th century implemented clear and sequenced hippodamian planning system, which contributed to positive compositional transformations of new construction sites. The blocks consisted of rectangular-shaped plots that each had a main façade and a back yard connecting it to the opposite plot with its main façade facing the parallel street. This urban development scheme formed a new compositional scheme – *frontal plot*.

In first city hotels the residential building (guesthouse) was located along city street, while the outbuildings serving the main building were located closer to the far of the plot. With such compositional structure, windows of hotel rooms overlooked both the street and the hotel's backyard. The compositional scheme itself with its single main building and no additional annexes significantly affected hotel's capacity. Such hotels had a small amount of rooms and a well-developed household yard, which could have for example a large barn. Therefore, such structure was typical for low comfort hotels, inns etc.

The key feature for plots formed according to the frontal compositional scheme was predominance of household yard over residential part. The division ranged from 60% / 40% to 70% / 30%, in favor of household yard. Such predominance of the service area, at that time, was not only due to large amount of outbuildings (barns; icehouse; food, inventory, hay and firewood storage sheds; cowsheds and piggeries, etc.), but also to the fact that cities had no centralized waste disposal system so all the hotel toilets and hotel's cesspit were located in household yard. This also negatively affected living conditions in hotels (Fig. 1).

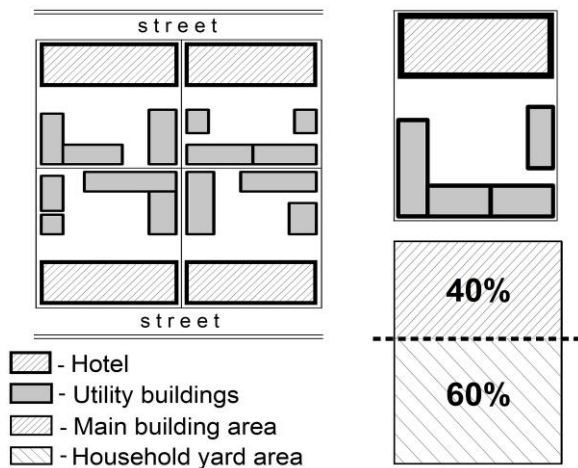


Fig. 1. Formation of the hotel frontal plot



<https://famoushotels.org/news/the-first-grand-hotel>

Fig. 2. «Grand Hotel» London. King Street 43, the beginning of the 19th century

Hotels with developed side wings. Long-distance traffic development in the late 18th – early 19th century increased tourist flow, which in turn led to a shortage of number of rooms in Western European cities. Existing hotels constructed according to the old compositional scheme could no longer cope with large influx of travelers. Thus, in order to increase hotel's capacity, side wings were constructed and attached to a facade building, therefore partly occupying household yard.

The emergence of hotels with developed side wings modernized site composition significantly and provided an opportunity to form a new hotel development concept. Interestingly, this was the scheme used to construct city residences and gentlemen clubs in 17th – 18th century in Western Europe. In the late 18th – early 19th centuries many of these establishments were transformed into luxury hotels. For example, the world's first "Grand Hotel" was located in a former Graf Ordoſſ's residence on 43 King Street in Convent-Garden neighborhood, London. The residence was renovated and turned into a top-class hotel by its owner David Low in 1744 [16]. The main hotel building had a few annexes with two-room hotel rooms for 15 shillings a night (Fig. 2).

Hotels arranged according to new compositional principles mostly had T- and L-shaped floorplans while more complicated floorplans (H- O- U- and E-shaped ones) were pretty rare which was due to lack of space on land plots and low profit since rooms in side wings were mostly cheap ones (Fig.3).

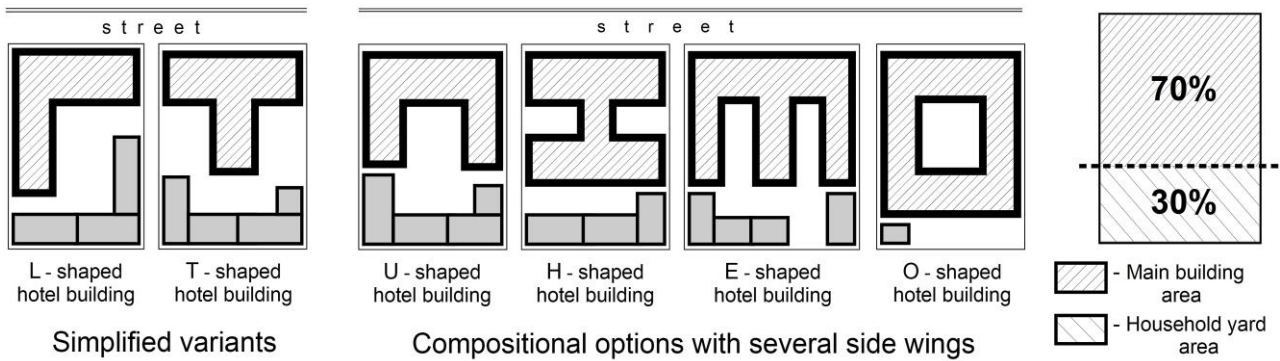


Fig. 3. Accommodation on the plot of hotels with several side wings

Therefore, complicated floorplans were mostly common for low-comfort hotels and furnished rooms that counted on minimal cost of rooms, which was possible because of overall amount of rooms and average rental duration. The number of rooms tended to increase by constructing additional buildings on a plot. Quality of service, comfort, decoration and equipment were not a priority for that category of hotels. Hence, this construction principle proved quite successful for low comfort hotels and remains largely unchanged to the present day (Fig. 4).

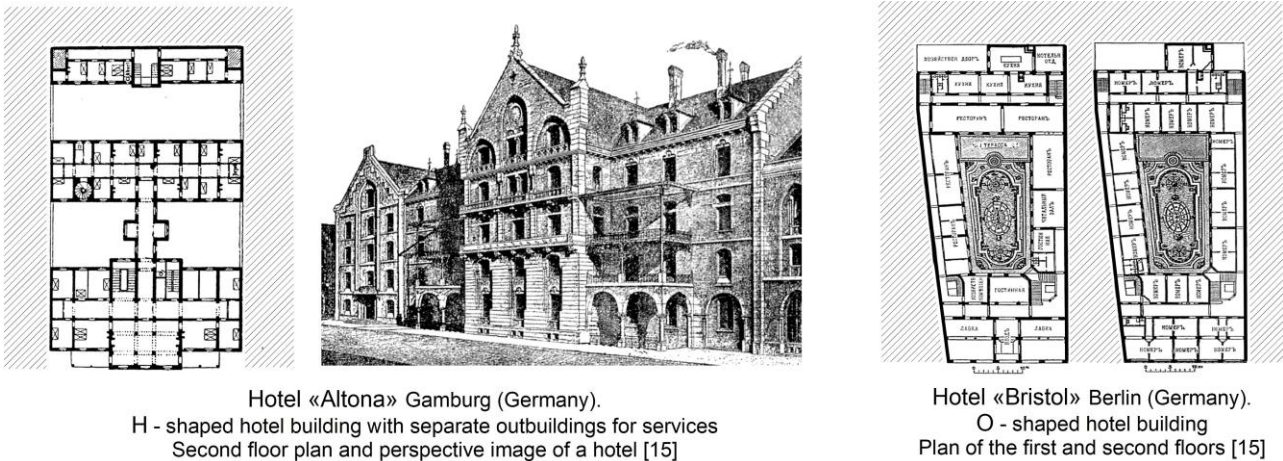


Fig. 4. Examples of European hotels with a complex form of plans on frontal urban plots

However, despite difficult urban conditions, some hotels kept trying to maintain high standards of service and comfort. These were isolated cases, but they did occur. For example, the Reichshof Hotel (architect Albert Böhm), that was built in 1893 in Berlin and had a U-shaped compositional scheme, was not directly on the list of first-class hotels (mainly because of its urban component), but had beautifully decorated interiors and facade, as well as high-tech equipment and facilities. At the end of the 19th century The Reichshof had all the benefits of a first-class hotel: electric lighting, central heating, elevator, bathrooms, and a restaurant where concerts took place in the evenings [17].

However, there was the urbanistic component (including problems with the number of rooms) that did not allow the "Reichshof" to actually obtain the status of a high-class hotel. One of the main requirements for a first-class hotel was the maximum possible amount of "luxury" rooms overlooking the main street (at that time it was considered the confirmation of hotel's high level of comfort). For hotels built according to the frontal scheme, this requirement was the essential obstacle. Only 27% of total number of Reichshof's rooms (15 out of 54 rooms) overlooked the city street. 66 % of deluxe rooms, which made up 33% of the total number of hotel rooms, were located in side wings of the hotel and overlooked the yard due to limited size of the site. Such a large percentage of "yard" rooms strongly affected hotel's prestige level and automatically reduced its class (Fig. 5).

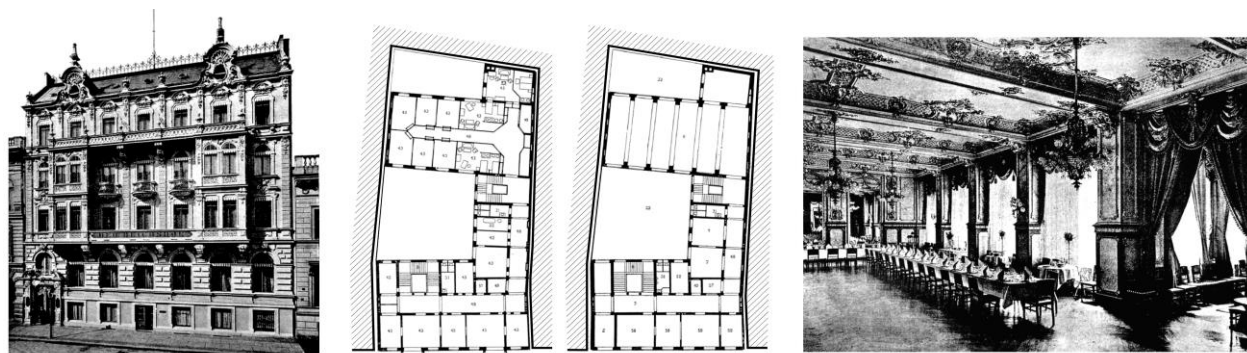


Fig. 5. Hotel «Reichshof» Berlin (Germany). Arch. A. Bohm 1898
 Perspective image, plans of first and second floors, the interior of the restaurant [15]

Therefore, such hotels, while suggesting quite high level of comfort, were characterized in tourist guides as "quiet and popular mainly among families or single women who want to rent for short term". Such characteristics were rather common for furnished rooms or small hotels [18].

Construction of additional residential buildings changed hotel site planning strategy dramatically. The increase in the number of rooms allowed enlarging the residential part of the plot with the proportional ratio from 70% / 30% to 80% / 20%, with its predominance. Such a transformation became possible due to decrease of the amount of utility buildings in a yard. Now these were only the most important for a hotel's functioning services ones: icehouse, goods and inventory storage, firewood storage. Besides that, internal sewage system was significantly modernized: water closets were relocated from a yard to a hotel building. The only serious disadvantage was the fact that cesspit was still located on the territory of a hotel. Despite the internal structure of public toilets, sewage still descended into the hotel latrine, which turned the household yard into a cesspool.

The real turning point in hotels' urban concept reformatting took place in the first half of the 19th century. Reconstruction of central areas of European cities, sharp growth of urban population, increasing tourist flow, urban environment transformations, new transport communications between cities and countries, led to the point when hotel companies began to play an important role in the city life. Due to new system of visitors' placement in European cities, hotels became more prioritized and therefore often located in city central areas or on the best plots at main city highways. The development of tourism and the influx of travelers on one hand and increasing cost of land plots in central areas as well as high tax rates on the other, led to the formation of new planning and compositional approaches for hotels in urban areas.

Through plot. We should consider the adoption of the unspoken rule for hotel owners to maximize the number of most expensive rooms, which made up the lion's share of the establishment's profit, a turning point in the typology of the world hotel industry. One option for achieving this goal was to combine two or more adjacent plots to obtain another frontal exit to the opposite street.

In the first half of the 19th century the scheme of combining plots on the backside became widespread – a *through plot* that made it possible to create a transit passage between two parallel streets, which increased the efficiency of using the plot area. At the same time, the number of expensive rooms increased at least twice - and a new functional and planning zone was created on the site of household yard – utilized internal space of a hotel (Fig. 6).

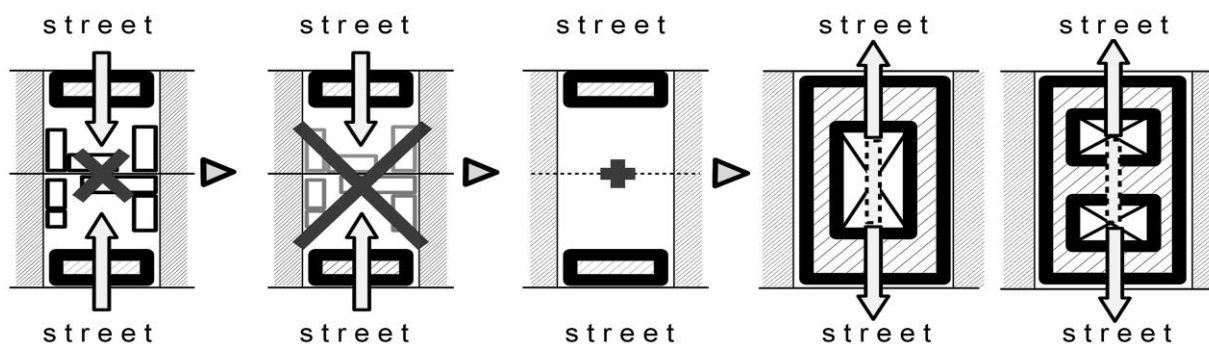
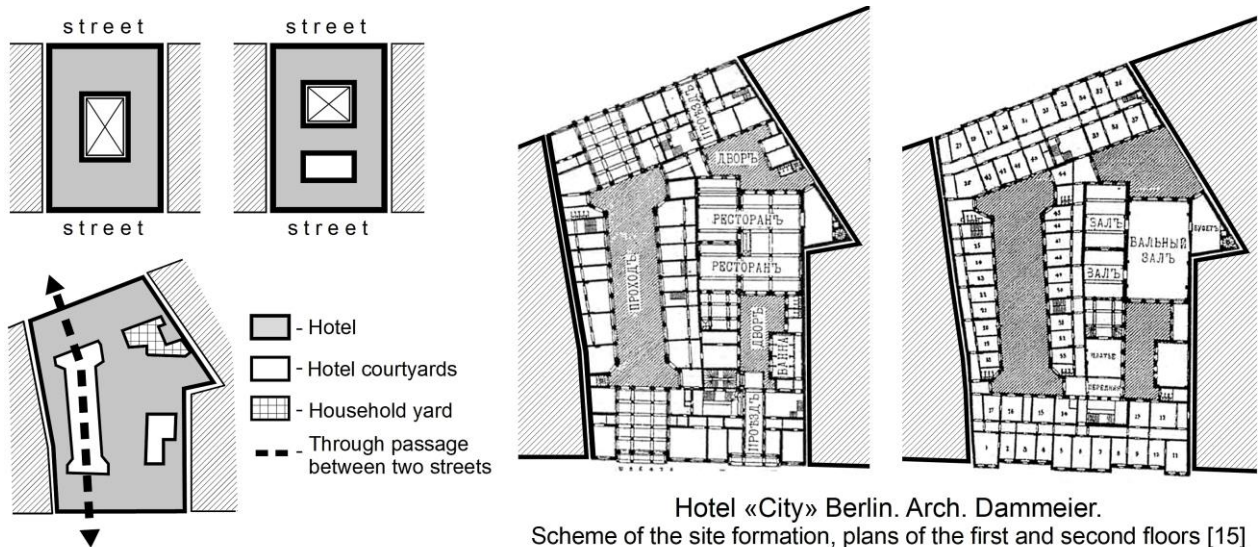


Fig. 6. Principles of forming a through plot by combining two adjacent frontal plots

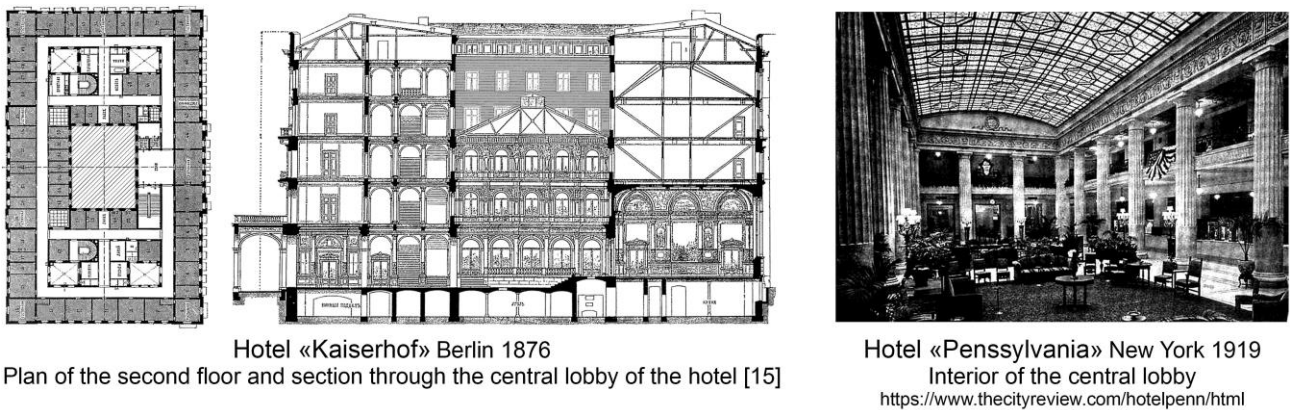
Such a step forced a review of established urban planning traditions, because until now all hotels had a clear division into a residential area, which contained rooms and a household yard, where all service facilities were located. The development of former household yard in the center of the newly created plot led to the transformation of the entire plot area into a single hotel complex with the predominance of residential area (Fig. 7).



Hotel «City» Berlin. Arch. Dammeier.
Scheme of the site formation, plans of the first and second floors [15]

Fig. 7. Examples of locating hotels on through plots

Depending on the size, the courtyard of the hotel was either open, when the dimensions did not allow it to be covered (as a rule, if its dimensions were more than – 20×20 m.), or turned into an internal space, glassed on the top, where the most important premises of the public area were located – the lobby, the restaurant hall, the main salon of the hotel, the large winter garden – and compositionally served as the main unifying element of the entire hotel (Fig. 8).



Hotel «Kaiserhof» Berlin 1876
Plan of the second floor and section through the central lobby of the hotel [15]

Hotel «Pennsylvania» New York 1919
Interior of the central lobby
<https://www.thecityreview.com/hotelpenn/html>

Fig. 8. Examples of glazed inner spaces in hotels of the early 20th century

Also, size of a courtyard affected the number of rooms of an establishment. If its dimensions were insufficient, rooms of a cheaper price category were located in the middle of the yard. If the size of the plot was large, then the frontal buildings could even be combined with three perpendicular wings, which allowed placing rooms with higher level of comfort there.

The principle of combining several adjacent plots made it possible to use up to 100% of plot area for the residential and public needs of a hotel. This served as an indicator of establishment's highest class, because such a compositional scheme was built on a model revolutionary for the 19th century: insertion of the former household yard directly into the structure of the hotel building. In fact, external area of a household yard was reduced to the area for delivery and unloading of products and fuel, and all storage and technical premises were henceforth located on hotel's

basement floors. The development of new engineering systems and communications in residential construction made it possible not only to make the most flexible and convenient interaction scheme of public and service areas, but also to subordinate the entire area of a hotel site to the residential part, making it the main and only compositional element of hotel complex spatial structure.

Corner plot. Significant changes occurred in Western European urban planning in the first half of the 19th century. New highways and squares were constructed; many entertainment and recreation venues (embankments, parks, etc.) were rebuilt. These transformations also affected hotel industry. Accent zones of transport corridors' intersections and areas at corners of newly created squares gained particular importance in new urban planning concept. Gradually, building hotels on street corners turned into predominating tendency. Corner plots were advantageous since overlooking several different city panoramas at once. It should also be noted that the principle of locating hotels at street corners gained most popularity among newly built establishments in Western Europe in second half of the 19th – early 20th century. At this time, several main variations of this compositional scheme were formed: classical angular, three-sided and trapezoidal (Fig. 9).

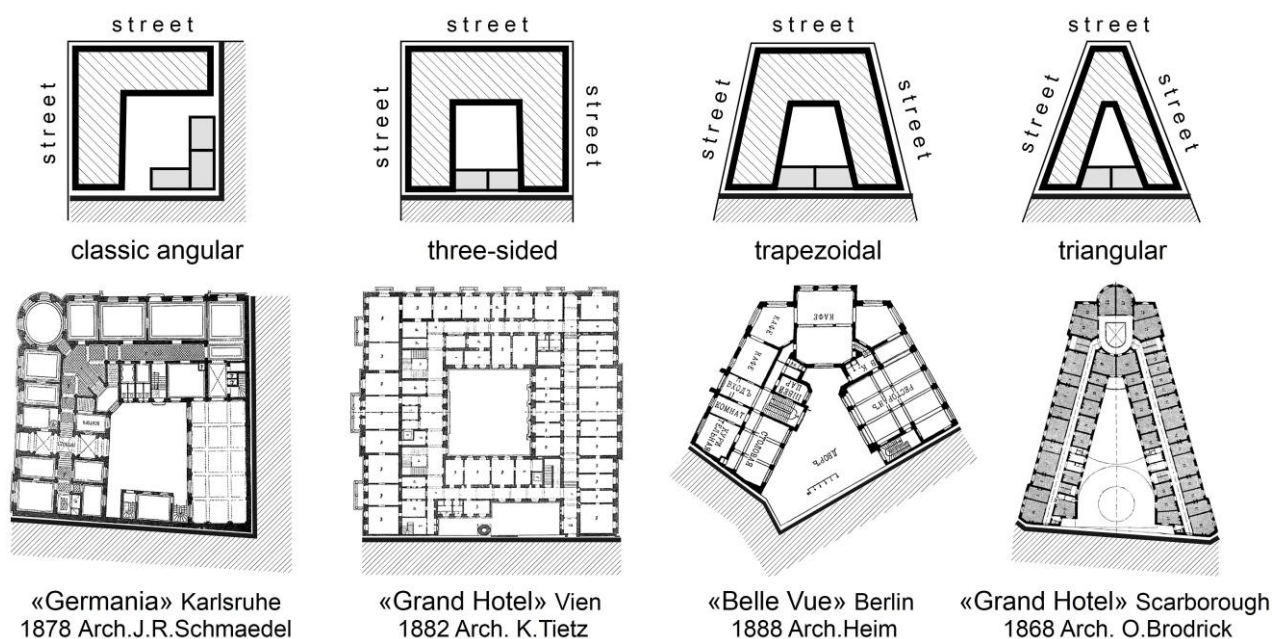


Fig. 9. Examples of hotel placement on corner plots [15]

According to the classical angular scheme, hotels were located on the intersection of two streets and had an L-shaped residential building. Ancillary services were located in a household yard. The main feature of the angular version was the accent on continuous planar perception of the main facade as a single compositional element. Just like the hotels constructed on through plots, ones with angular scheme had two main facades, and rooms with highest level of comfort overlooked these facades. However, the area of former household yard was used not particularly efficiently since due to small size of corner plots, there was lack of space to locate additional side buildings conveniently. The ratio of building density and efficient use of outdoor and interior spaces turned out much smaller than the one for a through plot. Thus, high comfort hotels with a large number of public spaces gradually left this compositional scheme behind. Consequently, the angular scheme either gradually transformed into more universal ones: three-sided and trapezoidal, or only remained relevant for low comfort hotels.

Since it was impossible to locate large hotels with high level of comfort on angular plots, the owners started looking for options that were more acceptable. One of those were hotels overlooking three adjacent city highways. Generally, such tripartite sections were located at city squares' and two adjacent streets intersections and less frequently at intersections of three streets. The main advantage of the three-sided composition was increase in number of expensive rooms by 1.5–2 times and opportunity for additional rental use of many rooms on the ground floor, which were leased to retail space to third-party tenants. With three equivalent residential blocks, it became possible to form a zone

of central interior space, which was a unifying compositional element of hotel planning structure. As in the case of a through plot, the interior space, depending on its size, could be either open – with landscaping elements, or glassed and uniting apartment blocks and main public areas around it.

Another variation of "corner section" compositional scheme was its trapezoidal version, according to which hotels were located at the intersections of city squares and formative ray-shaped streets. In reconstruction plans for 19th century European cities, many squares were formed with ray-shaped transport routes. Thus, the above-mentioned scheme for locating hotels on city plots was quite widespread. In contrast to the tripartite scheme that implied interaction of three "equal" facades, the trapezoidal composition was sometimes so narrowed to the top that it became almost triangular, generating more dynamic perception of an architectural object in urban landscape. In terms of scenic effect, this scheme had its own unique charm because of visual perspective cuts, but it was not particularly successful from functional point of view.

Reducing the build-up area and narrowing the shape of the courtyard resulted into a need to reformat hotels' room capacity. Instead of quite comfortable rooms overlooking inner yard, in hotels constructed according to three-sided scheme inner side was either occupied by cheap rooms, or remained unoccupied at all, which significantly affected establishment's profitability and competitiveness.

Hotel quarter. Another compositional scheme that played a key role in the evolutionary process of urban dimension of hotel development in Europe and the world was the hotel quarter. Only the most expensive hotels could afford occupying the whole quarter (Fig. 10).

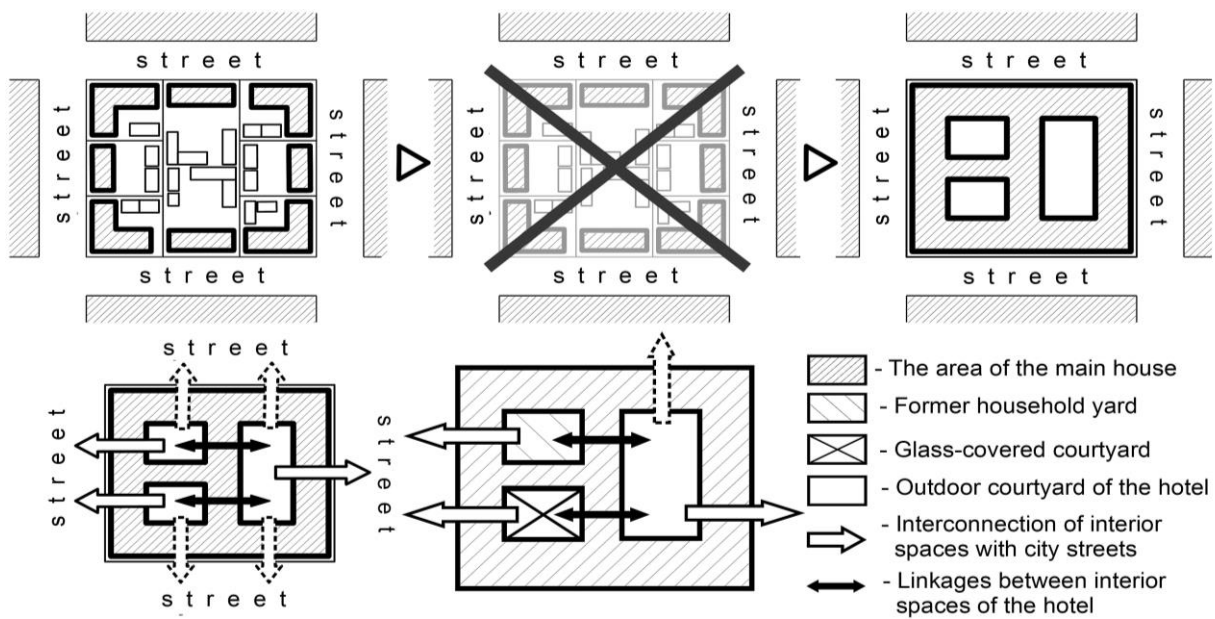


Fig. 10. The principle of the formation of the hotel quarter

Worth noting, that the design of the hotel quarter was formed under the effect on the market by affluent society who needed secluded and multifunctional places to stay. Therefore, the key precondition for emergence of this hotel type was increased demand for highest level of comfort and service. For implementing these grand ideas adjacent land plots were bought out which made it possible to build a single hotel block.

The prototype for such large hotels were gentlemen clubs and large private residences, for which comfort was associated with recreational function in the first place. For this reason, this kind of planning system usually included a few restaurants, luxury stores, greenhouses, exhibition halls, various recreational and entertainment zones and even theatres. Such hotels were most popular in big cities of the USA (New York, Chicago, Philadelphia, etc.) since hippodamian urban planning system made it easy to implement this approach (Fig. 11).

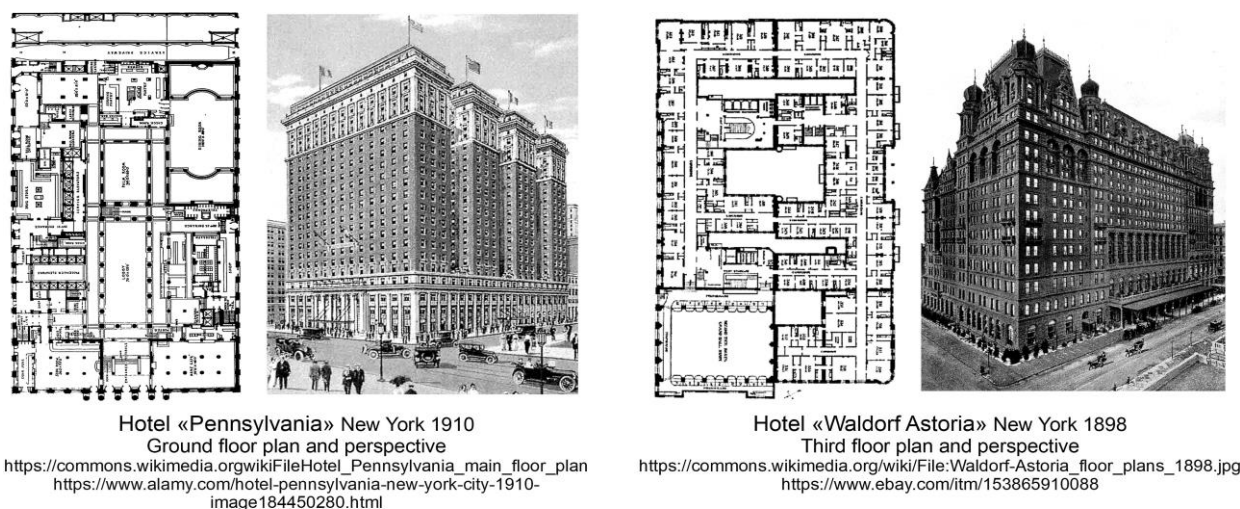


Fig. 11. Examples of large American hotels formed according to the principle of building a hotel quarter

In big European cities, hotels of this type had smaller size, building height and overall capacity, and were mostly occupied with catering establishments and recreation areas. Significant size of a newly constructed complex made it possible to form a few separate zones and inner spaces, different by function and structural interaction, with hotel's main premises. The essential goal of this approach is the structural multifunctionality of hotel complexes: in order to differentiate financial risks during maintenance, the owners were trying to fill the complex with diverse and self-sufficient infrastructure. This feature together with the fact that a hotel quarter was a private territory and a fully autonomous object lead to revolutionary transformations in the forming process of complicated inner planning structure such as differentiation of services, effective interaction between different functional zones, invention of new technological processes and implementation of new equipment. Such hotels were world's first multifunctional complexes that combined accommodation, service and entertainment options.

The key period of hotel urban planning development took place in 19th century, when industrial society began to evolve on the basis of the first Industrial Revolution. Rapid urbanization, development of science and technologies as well as expansion of long-distance transport, led to the creation of a new economic paradigm in the 19th century Western Europe and America. It became a catalyst for evolutionary processes in the global hotel industry. Thus, there is clear interdependence between the complexity of architectural and planning composition of hotels in urban areas and active society development, both industrial and economic. Over the centuries, hotel industry made its way from compositionally simple frontal area scheme to self-sufficient functional hotel quarters. Increasing capacity of hotels, new requirements towards living conditions for hotel residents and quality of service, technological and engineering innovations have led to significant transformations and predominance of compositional scheme, in which up to 100% of a land plot was occupied with hotel buildings instead of former courtyards. Due to this complicated shapes of residential buildings evolved as well as multifunctional organization of hotel public areas (Fig. 12).

Conclusion. The conducted research revealed an interesting pattern: the transformational processes that took place in the hotel industry during the 19th century under the influence of many external factors, formed a whole series of compositional, town-planning options for placement of hotels on city sites, which in their basic planning structure, have survived to this day. Industrial revolution of late 18th and early 19th centuries changed not only social, demographic and urban structure of the world, but also gave a powerful impetus to hotel industry development. Thanks to the conducted analysis, four main compositional options for hotel construction in urban areas were singled out, as well as the factors that influenced their formation were investigated.

During the 19th century, global hotel industry has gone through a rapid evolutionary path from the simplest compositional schemes for development of urban areas to multifunctional hotel complexes that occupied whole blocks and formed the most effective model that allowed revealing the full potential of urban planning component in conditions of dense urban development.

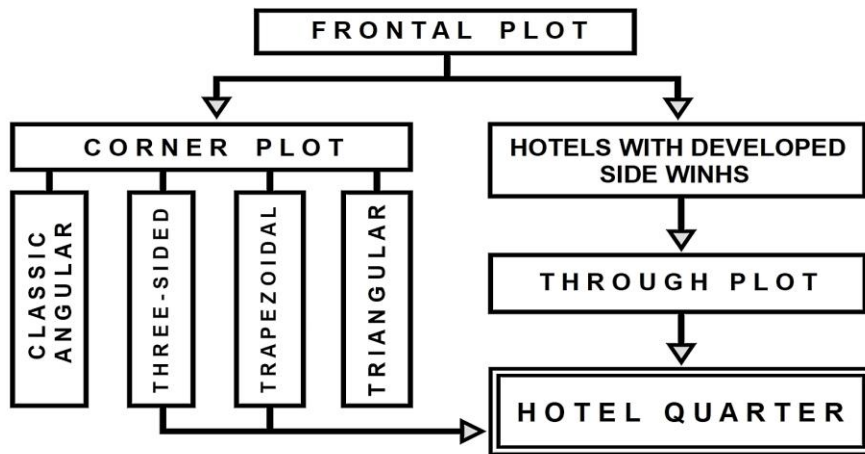


Fig. 12. The evolution of the formation of the compositional component of the development of hotel plots during the XXth - early 20th centuries

Among the main revolutionary changes in urban planning component, we should note the active transformation of the area of the former household yard to meet public needs of a hotel. The philosophy of increasing the amount of rooms for the benefit of establishment's profitability led to gradual complication of compositional arrangement scheme, up to complete development of the whole hotel plot with the separation of one or more internal atriums used for separate public rooms and areas of a hotel.

Taking into account limited amount of modern scientific material on this historical period, which was important for the world hotel industry formation, the importance of deeper study of this topic is noted, since it not only contributes to a better understanding of processes that took place in European urban planning during the 19th century, but also allows extrapolation of research data on a similar historical stage of development in Ukrainian architecture, especially in the context of modern construction or reconstruction of hotels in city's historical quarters.

References

- [1] N.Yu. Merzhiievskia, "Arkhitekturno-planovalna reorhanizatsiia hoteliv 4-5 zirok v istorychnykh budivliakh tsentra mista (na prykladi mista Odesa)", dys. ... kand. arkh.: 18.00.02. Kyiv, 2013.
- [2] E.E. Rogozhnikova, "Arkhitektura gostinits maloy vmestimosti v usloviyakh rekonstruktsii istoricheskikh gorodov Ukrainy", dis. ... kand. arkh.: 18.00.02. Kiyev. 1992.
- [3] L.Yu. Bridnia, "Osoblyvosti zabezpechennia mistobudivnoi tsilisnosti pry budivnytstvi ta rekonstruktsii hoteliv", *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, vol. 55, pp. 36-40, 2015.
- [4] N.Yu. Vatamaniuk, "Aktualni problemy vnutrishnokvartalnykh prostoriv v istorychnii zabudovi (na prykladi mista Chernivtsi)", *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia*, vol. 52, pp. 174-179, 2018.
- [5] N.Yu. Merzhiievskia, "Mistobudivne doslidzhennia ta rozmishchennia istorychnykh hoteliv vysokoi katehorii", *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, vol. 53, pp. 334-338, 2014.
- [6] N.Yu. Merzhiievskia, "Vplyv osoblyvosti istorychnykh hoteliv na arkhitekturno –planovalnu strukturu hoteliu katehorii 4-5 zirok", *Arkhitekturnyi visnyk KNUBA*, vol. 3, pp. 214-218, 2014.
- [7] V.N. Kiselev. A.V. Kiseleva, "Printsipy arkhitekturno- landshaftnoy renovatsii istoricheskikh tsentrov gorodov", *Arkhitekturniy visnyk KNUBA*, vol. 14-15, pp. 354-357, 2018.
- [8] P. Damm-Etienne, *Das Hotelwesen*. Leipzig: Teurbner Verlag, 1910.
- [9] L. Klasen, *Gasthauser, Hotel und Restorants*. Leipzig. Baumgärtner Verlag, 1890.
- [10] L. Klasen, *Grundriss-Vorbilder von Gebäuden aller Art. Gasthäuser, Hotels und Restaurationen*. Leipzig: Baumgärtner Verlag, 1884.
- [11] F. Kunz, *Der Hotelbau von Heute*. Stuttgart: Hoffmann Verlag, 1930.
- [12] P. Glucksmann, *Das Gaststättenwesen*. Stuttgart: C.E. Poeschel Verlag, 1927.

- [13] M. Wohler, *Gausthuser und Hotels*. Leipzig: Goschensche Verlag, 1911.
- [14] J. Durn, H. Ende, *Handbuch der Architectur. 4 theil, 4 halbband, 1 heft*. Stuttgart: Bergstrasser Verlag, 1904.
- [15] G.V. Baranovskiy, *Arkhitekturnaya entsiklopediya vtoroy poloviny XIX veka. Tom IV. Zhilishcha i sluzhby*. Sankt-Peterburg: Stroitel, 1904. pp. 643–693.
- [16] "The First "Grand" Hotel". [Online]. Avialable: <https://famoushotels.org/news/the-first-grand-hotel>.
- [17] K. Baedeker, *Berlin und Umgebung. Handbuch fur Reisende*. Leipzig: Verlag von Karl Baedeker, 1904.
- [18] *Berlin und Berliner Leute. Dinge. Sitten. Winke*. Karlsruhe: J. Bielefelds Verlag. 1905.

ЕВОЛЮЦІЯ ФОРМУВАННЯ ЗАБУДОВИ ГОТЕЛЬНИХ ДІЛЯНОК В МІСТАХ ЗАХІДНОЇ ЄВРОПИ XVIII – ПОЧАТКУ XX СТ.

Ширяєв Т.В., к. арх.,

shiryayev.tv73@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8412-9017

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

Анотація. У статті проаналізовано розвиток та формування містобудівного аспекту забудови готельних ділянок в умовах серйозних урбаністичних змін, що відбувалися в містах Західної Європи протягом XVIII – початку XX ст. Досліджено, як завдяки зовнішнім факторам впливу формувалися нові композиційні схеми розміщення готелів на міських ділянках та вибудовувалися більш сучасні алгоритми взаємодії між чинними містобудівними реаліями й формуванням новітніх та вдосконалених функціонально-планувальних пропозицій у проектуванні, будівництві та експлуатації європейських готелів другої половини XIX – початку XX ст. Побудована шкала еволюційних містобудівних змін за цей історичний період та виявлено чотири основних композиційних варіантів побудови готелів у міському середовищі: фронтальна ділянка, наскрізна ділянка, наріжна ділянка та готельний квартал. Проаналізовано превалюючі схеми розташування готелів на цих ділянках та досліджено, яким чином зовнішні фактори впливу не тільки змінили містобудівну концепцію, а й сприяли появі революційних архітектурно-планувальних рішень, які у своїй основній структурі, майже без змін, збереглися до наших днів.

Серед головних особливостей розвитку містобудівної складової забудови готельної ділянки, слід відзначити активне освоєння території колишнього господарського подвір'я готелів, яке було органічно додано до функціонально-планувальної структури та перетворилося на повноцінну додаткову громадську зону готелю. Філософія переформатування колишньої службової зони дозволила не тільки збільшити номерний фонд та підвищити рентабельності закладу, а й призвела до поступового ускладнення композиційної складової та повної забудови ділянки з виділенням одного чи декількох внутрішніх атріумів, які були залучені в окремих громадських просторах та готельних зонах.

На тлі наявності обмеженої кількості історичного дослідницького матеріалу, зауважена важливість глибшого вивчення даної теми, оскільки вона сприяє кращому розумінню процесів, які відбувалися у містобудівній складовій готельного господарства в містах України другої половини XIX – початку XX ст., особливо в контексті сучасної забудови міських історичних кварталів.

Ключові слова: готель, місто, Європа, композиція, місце розташування, ділянка, гіподамова система, внутрішній простір, господарське подвір'я.

Стаття надійшла до редакції 17.05.2022

ФОРМУЛА ПОВНОЇ ДІАГРАМИ НАПРУЖЕННЯ-ДЕФОРМАЦІЯ ДЛЯ СТИСКУ БЕТОНУ В УМОВАХ ПОЖЕЖІ ТА ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

¹**Бутенко С.В.**, к.т.н., доцент,
svbusan87@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6083-7668

¹**Плахотнікова І.А.**, к.т.н., доцент,
ira5657@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1986-4215

¹**Колесніков С.М.**, аспірант,
555ksn555@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2090-9647

¹*Харківський національний університет будівництва та архітектури*
вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна

Анотація. Теорія розрахунку залізобетонних конструкцій на вогнестійкість в цілому не є повністю розробленою. Серед методів розрахунку, викладених в нормах проектування й поділених на табличні дані, спрощені і уточнені методи відносно розвиненими є перша та друга група. А ось уточнені методи не описані зовсім, а мають тільки основні вимоги. Складність розробки уточнених методів розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій обумовлена: по-перше нелінійними міцнісними, деформаційними, теплофізичними та термомеханічними властивостями бетону і арматурної сталі та їх зміною з температурою; по-друге нелінійними температурними впливами, що спричинює пожежа і відповідно нелінійними нестационарними процесами теплообміну, що в результаті дає нелінійний розподіл теплових полів в об'ємі чи в перерізі елемента.

Однією з причин, що гальмує розвиток уточнених методів розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій, на думку авторів статті, є відсутність чіткого аналітичного опису (формули) повної (включаючи висхідну й низхідну гілки) діаграми «напруження-деформації» для бетону в умовах пожежі і при високих температурах. Такі формули були запропоновані багатьма авторами до цього, але така формула має відповідати вимогам, що були сформульовані й обґрунтовані в попередніх теоретичних дослідженнях.

Стаття присвячена отриманню формули повної діаграми «напруження-деформації» для стиску бетону, в умовах пожежі і при високих температурах. Отримання формули базується на знаннях, викладених в нормах проектування для нормальних температур і попередніх дослідженнях авторів статті, які й стають їх логічним продовженням. Виконана перевірка отриманої формули вимогам, сформульованим в попередніх дослідженнях і проведено порівняння з наявними експериментальними даними. Також отримані аналітичні залежності для температурних коефіцієнтів, виконано їх порівняння з даними, що містяться в нормах проектування.

Отримані результати можуть використовуватись як при розробці нових методів розрахунку вогнестійкості, що відносяться до уточнених, так і в існуючих, як альтернатива загальновідомим даним. Також можливе застосування в розрахункових комп'ютерних комплексах для опису деформації одновісного стиску бетону при різних температурах та при градієнті температур.

Ключові слова: діаграма «напруження-деформації», бетон, високі температури, пожежа.

Вступ. Сучасна будівельна наука володіє значним арсеналом методів щодо розрахунку залізобетонних конструкцій і їх елементів на вогнестійкість. В цьому питанні існує класифікація за табличними даними, спрощеними методами й уточненими [1]. Перші дві категорії розвинені досить широко й мають певні переваги, такі як: простота розрахунків,

зрозумілість, але мають свої обмеження у застосуванні, оскільки можуть використовуватись тільки для певних режимів пожежі, мають обмеженість в температурних діапазонах і наявність певної кількості припущень та спрощень.

Уточнені методи розрахунку більш складні в застосуванні, але не мають обмежень в режимах пожежі, позбавлені припущень і спрощень, їх використання може бути більш широким. Уточнені методи потребують розробки широкого і складного математичного апарату, що в майбутньому увійде в комп'ютерні програми з розрахунку залізобетонних конструкцій та їх елементів на вогнестійкість.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В нормах проектування [1-3] діаграма «напруження-деформації» для бетону в умовах пожежі і при високих температурах викладена двома частинами: висхідна гілка описана дрібно-ступеневою функцією, для низхідної гілки аналітичного опису не дано, а наведено тільки дозвіл на використання лінійних або нелінійних моделей.

В оглядовій статті американського вченого В Кодура [4] наведено різні аналітичні описи діаграми «напруження-деформації» для стиску бетону, як з норм проектування, так і автора. Але потрібно зазначити, що вони є кусковими функціями і кожна частина описує свій діапазон деформацій. Використання кускових функцій є незручним, а іноді й неможливим при розробці та розрахунках уточненими методами визначення вогнестійкості.

В роботі [5] також наведені формули для опису діаграми «напруження-деформації» для бетону як автора та і різних авторів, та виконано їх порівняння. Проаналізувавши викладене можна зауважити, що частина варіантів погано узгоджується з експериментами, частина є кусковими функціями, частина не включає в себе початковий модуль пружності бетону.

Мета та завдання. Метою дослідження є розробка формули повної діаграми «напруження-деформації» для бетону в умовах пожежі й при високих температурах, яка буде відповідати встановленим в попередній роботі [6] вимогам.

Матеріали і методика дослідження. Для виконання поставленої мети в даній роботі використовувались наступні методи дослідження: загально-логічні методи (аналіз, синтез, аналогія), математична формалізація.

Результати досліджень. В попередній роботі [7] було показано, що:

1. Температура не змінює характер нелінійності деформації бетону при одновісному стиску. Показано, що характер нелінійності деформації бетону залежить виключно від класу бетону.

2. Зв'язок між температурними коефіцієнтами січного модуля пружності бетону $K_{E\theta}$, максимального напруження стиску бетону $K_{f\theta}$ та деформації максимального напруження бетону $K_{\varepsilon\theta}$ реалізується простим співвідношенням:

$$\frac{K_{E\theta} \cdot K_{\varepsilon\theta}}{K_{f\theta}} = 1. \quad (1)$$

3. У формулі діаграми «напруження-деформації» для бетону при стиску:

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}, \quad (2)$$

де

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}, \quad (3)$$

$$k = \frac{1.05 \cdot E_{cm} \cdot \varepsilon_{c1}}{f_{cm}}, \quad (4)$$

що наведена в нормах проектування залізобетонних конструкцій при нормальних температурах [8] величина k визначена як параметр, що характеризує пружно-пластичні властивості бетону, не залежить від температури, але залежить виключно від класу бетону:

$$k \neq f(\theta). \quad (5)$$

Отже, враховуючи вищенаведене, формулу (2) можна адаптувати для опису повної діаграми «напруження-деформації» стиску бетону, в умовах пожежі й при високих температурах:

$$\sigma_c = f_{cm} \cdot K_{f\theta} \cdot \frac{k \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}} \right)^2}{1 + (k-2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}}}, \quad (6)$$

де $K_{f\theta}$ – температурний коефіцієнт максимального напруження стиску бетону;

$K_{\varepsilon\theta}$ – температурний коефіцієнт деформації максимального напруження бетону.

Враховуючи, що температурні коефіцієнти залежать виключно від температури та параметр k залежить від класу бетону, а клас бетону визначається максимальним напруженням стиску f_{cm} , то формулу (6) можна виразити так:

$$\sigma_c = f_{cm} \cdot F_1(\theta) \cdot \frac{k \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot F_2(\theta)} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot F_2(\theta)} \right)^2}{1 + (k-2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot F_2(\theta)}} = f_{cm} \cdot F_1(\theta) \cdot \frac{F_k(f_{cm}) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot F_2(\theta)} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot F_2(\theta)} \right)^2}{1 + (F_k(f_{cm}) - 2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot F_2(\theta)}}. \quad (7)$$

Потрібно зауважити, що формули (6) і (7) при $\theta = 20^\circ\text{C}$ перетворюються в формулу (1), що непрямою іншим варіантам, викладеним в роботах [4, 5].

Ще однією властивістю запропонованої формули (6) та (7) є існування первісної по змінній ε_c :

$$\int f_{cm} \cdot K_{f\theta} \cdot \frac{k \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}} \right)^2}{1 + (k-2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}}} d\varepsilon_c =$$

$$= f_{cm} \cdot K_{f\theta} \cdot \frac{(k-2) \cdot (\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta} \cdot (k-1))^2 - \frac{k-2}{2} \varepsilon_c \cdot \varepsilon_c - (\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta} \cdot (k-1))^2 \cdot \ln((k-2)\varepsilon_c + \varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta})}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta} \cdot (k-2)^3} \quad (8)$$

що необхідно при розрахунках вогнестійкості у відповідності з методикою, викладеній в роботі [9], коли інтеграл по площі перерізу є силою стиску бетону стиснутої зони балки.

Також доцільно отримати похідну від формули (6), фізичним змістом якої буде модуль пружності:

$$E_{c\theta} = \frac{d}{d\varepsilon_c} \left(f_{cm} \cdot K_{f\theta} \cdot \frac{k \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}} \right)^2}{1 + (k-2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}}} \right) =$$

$$= f_{cm} \cdot K_{f\theta} \cdot \frac{((k-2)\varepsilon_c + k \cdot \varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}) \cdot (\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta} - \varepsilon_c)}{(\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta} + (k-2)\varepsilon_c)^2 \cdot \varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}} \quad (9)$$

Важливим критерієм отриманої формули (6) є порівняння з експериментальними даними. На рис. 1 виконано порівняння з експериментальними даними, що наведені в нормах проектування Великобританії [10] та адаптованою формулою (6).

З графіка (рис. 1) видно, що запропонована формула (6) досить точно описує експериментальні діаграми «напруження-деформації» для бетону при одноосному стиску на висхідній гілці. На низхідній є розбіжність в сторону занижених значень, але це не є суттєвим недоліком оскільки при розрахунках будуть дещо нижчі значення. Також потрібно

зробити уточнення, що існує думка, що характер низхідної гілки діаграми «напруження-деформації» залежить від швидкості навантаження випробуваного зразка бетону [11] і, тому в різних джерелах [12] низхідна гілка може мати різну форму.

Наступне уточнення полягає в тому, що у позациентрово стиснутих залізобетонних елементах будівель при невеликих значеннях ексцентриситету e , коли:

$$e < 0.1h, \quad (10)$$

де h – висота перерізу;

Величину граничної деформації бетону необхідно обмежувати деформацією максимального напруження бетону ε_{c10} [8]. У такому випадку низхідна гілка не бере участі у розрахунках зовсім.

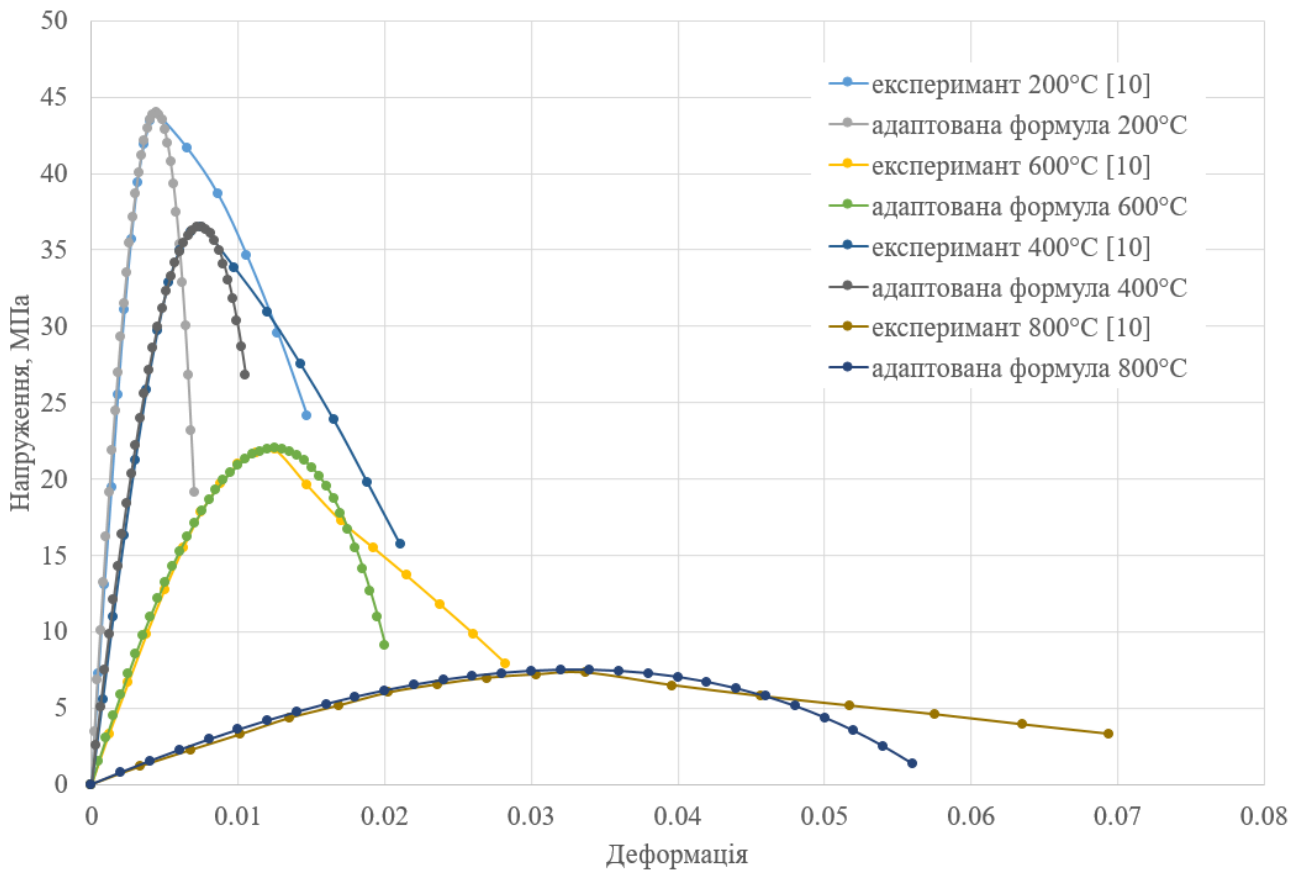


Рис. 1. Порівняння діаграм «напруження-деформації» для стиску бетону класу C32/40 (B40) при різних температурах

За допомогою формули (6) можливо описати напружено-деформований стан перерізу залізобетонного елемента, що має високу температуру (рис. 2, а), але однакову по всьому перерізу. Такий випадок в практиці майже не зустрічається. Хоча розрахунки спрощеними методами (метод 500°C, зональний метод) дещо подібні до цього, коли на кінцевому етапі розрахунку частина перерізу без зміни температури.

Але, при розрахунках вогнестійкості в перерізі елемента, маємо нестационарне температурне поле, що описується експонентною функцією (рис. 2, б). Також при розрахунках конструкцій, що працюють під впливом технологічних температур (наприклад коксові батареї) маємо в перерізі стаціонарне температурне поле, що буде описуватись лінійними функціями (рис. 2, в).

В останніх двох випадках маємо плавну зміну властивостей матеріалу (бетону) по площині перерізу в одному або двох напрямках, викликаних дією температури. Тобто будуть змінюватись модуль пружності, максимальне напруження стиску, деформація при

максимальному напруженні. У формулі (7) це виражено через функції $F_1(\theta)$, $F_2(\theta)$. Ці функції в числовому вигляді і дискретно з кроком 100 °С виражені в нормах проектування в таблиці 3.1 [1] для бетонів на силікатному та карбонатному заповнювачах. Але для розрахунків необхідний їх аналітичний вигляд у вигляді неперервної, не кускової функції.

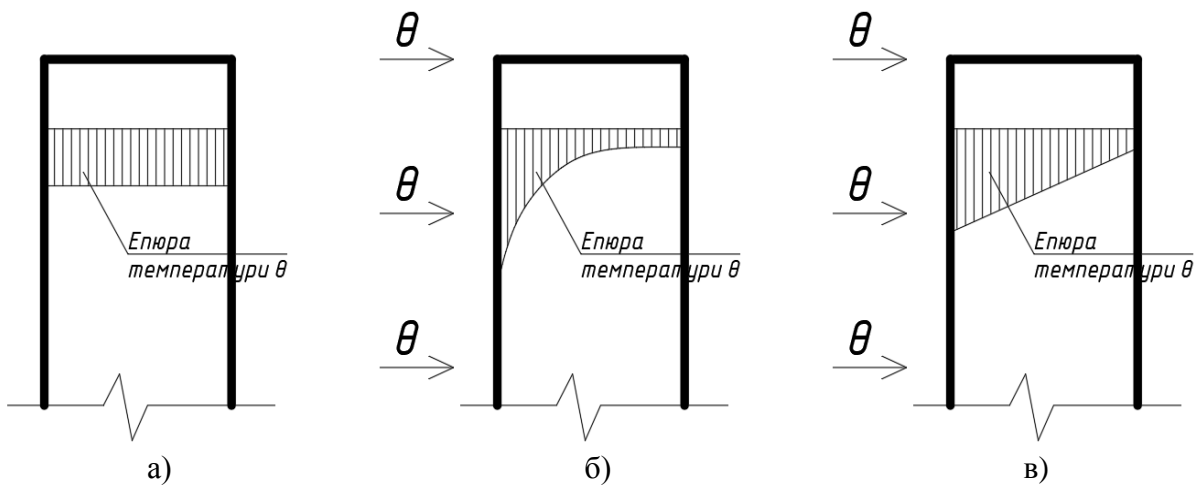


Рис. 2. Варіанти розподілу температур в перерізі залізобетонного елемента (показано у плоскій формі):

а – підвищена температура; б – дія пожежі, розрахунки на вогнестійкість; в – технологічні температури

На даному етапі досліджень є можливим запропонувати наступні залежності для опису функції $F_1(\theta)$, $F_2(\theta)$ на силікатному заповнювачі:

$$F_1(\theta) = \frac{f_{cm\theta}}{f_{cm}} = 2 \cdot 10^{-9} \cdot \theta^3 - 3.43 \cdot 10^{-7} \cdot \theta^2 + 4.12 \cdot 10^{-4} \cdot \theta + 0.99, \quad (11)$$

$$F_2(\theta) = \frac{\varepsilon_{cl\theta}}{\varepsilon_{cl}} = \frac{2.58 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^3 - 2.16 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^2 + 3.15 \cdot 10^{-3} \cdot \theta + 0.87}{1.86 \cdot 10^{-12} \cdot \theta^4 - 3.83 \cdot 10^{-9} \cdot \theta^3 + 5.93 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^2 - 4.15 \cdot 10^{-3} \cdot \theta + 1}. \quad (12)$$

Далі наведено графіки для порівняння значень функцій у формулах (11) (рис. 3) та (12) (рис. 4) з даними, що містяться в нормах проектування [1]. Потрібно відмітити, що в роботі [5] запропоновані різні аналітичні значення для деформації максимальної міцності бетону $\varepsilon_{cl\theta}$, але вони не задовольняють вимогам, наведеним вище.

Наведені формули (11, 12) добре узгоджуються з даними норм проектування [1], хоча є несуттєві розбіжності на деяких ділянках.

Висновки. На підставі попередніх досліджень виконана адаптація формули, що описує повну діаграму «напруження-деформації» стиску бетону в нормальних умовах, для використання в умовах пожежі й при високих температурах. Отримана формула включає всі основні характеристики бетону, такі як модуль пружності, максимальне напруження стиску, деформація при максимальному напруженні, описує як висхідну, так і низхідну гілки діаграми «напруження-деформації» при одновісному стиску. Адаптована формула є нелінійною, не кусковою функцією, має первісну й похідну, що значно полегшує її використання при розрахунках.

Адаптована формула добре узгоджується з експериментальними даними, наведеними в різних джерелах. Також при введенні функцій (поліном, дрібно-степеневі) температурних коефіцієнтів може використовуватись при розрахунках на вогнестійкість і для опису напруженого-деформованого стану перерізу залізобетонного елемента, що має нелінійну зміну температур, викликану впливом пожежі.

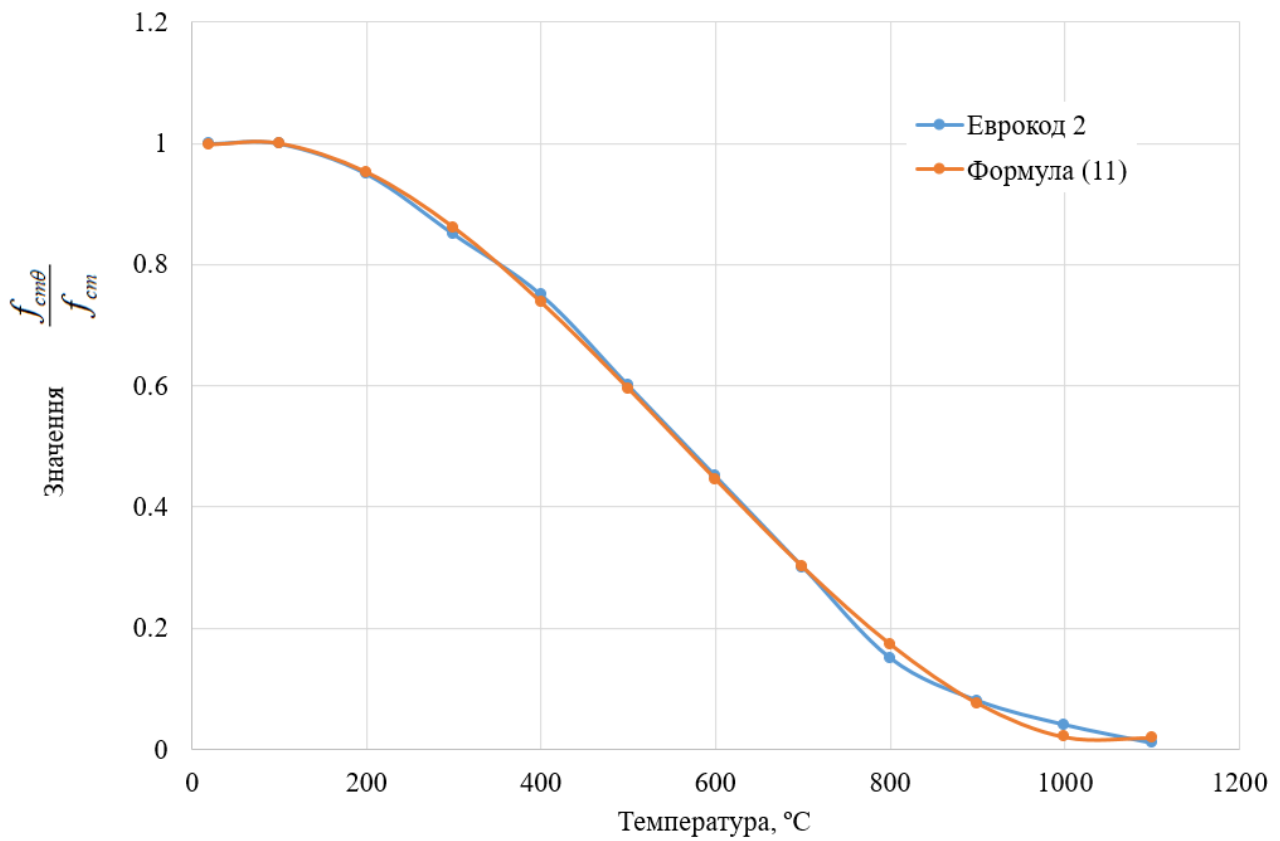


Рис. 3. Порівняння зміни з температурою коефіцієнта максимальної міцності бетону за формулою (11) з даними норм проектування [1]

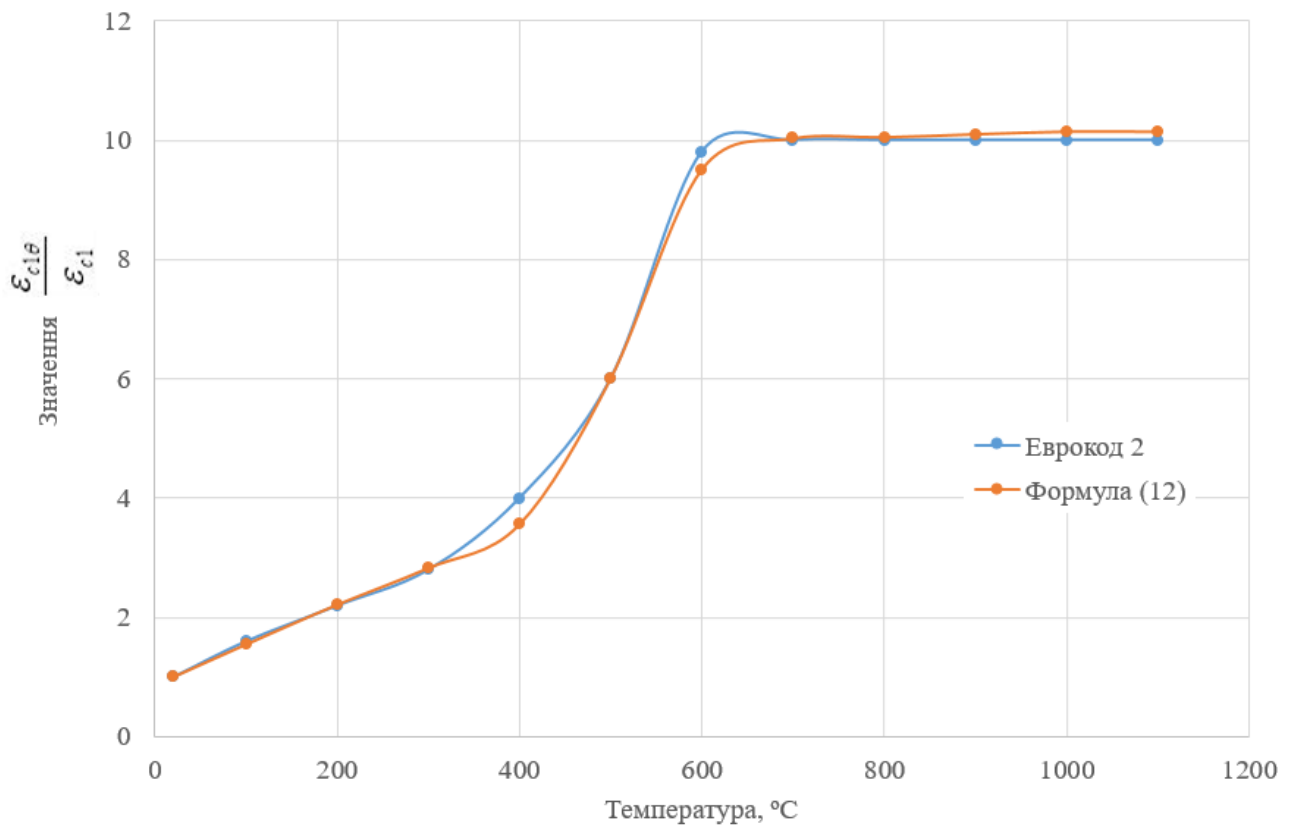


Рис. 4. Порівняння зміни з температурою коефіцієнта деформації максимальної міцності бетону за формулою (12) з даними норм проектування [1]

Література

1. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT). Мінрегіон України. Київ. 2012.
2. ДСТУ-Н Б В.2.6-196:2014. Національний стандарт України. Настанова з проектування залізобетонних балок. Розрахунок на вогнестійкість. Мінрегіон України. Київ. 2015.
3. ДСТУ-Н Б В.2.6-197:2014. Національний стандарт України. Настанова з проектування залізобетонних колон. Розрахунок на вогнестійкість. Мінрегіон України. Київ. 2015.
4. Kodur, Venkatesh. Properties of Concrete at Elevated Temperatures. ISRN Civil Engineering. 2014. 1-15. 10.1155/2014/468510.
5. Bastami, Morteza & Aslani, F. & Omran, M. High-Temperature Mechanical Properties of Concrete. *International Journal of Civil Engineering*. 2010. 8. pp. 337-351.
6. Fomin S.L., Bondarenko Y.V., Butenko S.V. and Koliesnikov S.M. Scientific approach to fire resistance calculation of reinforced concrete beams and columns. *Materials Science and Engineering, International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020)*. Vol. 1021, <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1021/1/012013>.
7. Колесніков С.М. Визначення теоретичних залежностей між температурними коефіцієнтами для бетону, що працює в умовах пожежі та при високих температурах. «Науковий вісник будівництва». 2021. т. 105. №3. С. 75-81. doi.org/10.29295/2311-7257-2021-105-3-75-81.
8. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1992-1-1:2004, IDT). Мінрегіон України. Київ. 2010.
9. Колесніков С.М. Нелінійна методика розрахунку вогнестійкості стрижневого залізобетонного елемента (балка) на дію згинального моменту через розрахунок максимальної несучої здатності його нормального перерізу на визначений момент часу при будь яких температурних впливах. «Науковий вісник будівництва». 2021. т. 106. №4. С.107-115. doi.org/10.29295/2311-7257-2021-106-4-107-115.
10. DD ENV 1992-1-2:1996. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.2 General rules – Structural fire design – (together with United Kingdom National Application Document). Мінрегіон України. Київ. 1996.
11. Довженко О.А., Погребной В.В. Гармонизация диаграммы деформирования бетона при сжатии для применения в расчетах железобетонных элементов на основе европейских норм. Инновационная подготовка инженерных кадров на основе европейских стандартов (Еврокодов): материалы Международной научно-технической конференции. Минск : БНТУ, 2017. С. 56-65.
12. Fib Bulletin No. 38 Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling. State-of-art report (106 pages, ISBN 978-2-88394-078-9, April 2007 doi.org/10.35789/fib.BULL.0038).

References

- [1] DSTU-N B EN 1992-1-2:2012. Yevrokod 2. Proektuvannia zalizobetonnykh konstrukttsii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstrukttsii na vohnestiikist (EN 1992-1-2:2004, IDT). Minrehion Ukrainy. Kyiv. 2012.
- [2] DSTU-N B V.2.6-196:2014. Natsionalnyi standart Ukrainy. Nastanova z proektuvannia zalizobetonnykh balok. Rozrakhunok na vohnestiikist. Minrehion Ukrainy. Kyiv. 2015.
- [3] DSTU-N B V.2.6-197:2014. Natsionalnyi standart Ukrainy. Nastanova z proektuvannia zalizobetonnykh kolon. Rozrakhunok na vohnestiikist. Minrehion Ukrainy. Kyiv. 2015.
- [4] Kodur, Venkatesh, "Properties of Concrete at Elevated Temperatures", *ISRN Civil Engineering*, pp. 1-15, 2014. doi.org/10.1155/2014/468510.
- [5] Bastami Morteza, F. Aslani, M. Omran, "High-Temperature Mechanical Properties of Concrete", *International Journal of Civil Engineering*, no. 8, pp. 337-351, 2010.
- [6] S.L. Fomin, Y.V. Bondarenko, S.V. Butenko and S.M. Koliesnikov, "Scientific approach to fire resistance calculation of reinforced concrete beams and columns", *Materials Science and Engineering, International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020)*, vol. 1021, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1021/1/012013>.
- [7] S.M. Koliesnikov, "Vyznachennia teoretychnykh zalezhnosti mizh temperaturnymy koefitsientamy dlia betonu, shcho pratsiue v umovakh pozhezhi ta pry vysokyykh temperaturakh", *Zbirnyk naukovykh prats «Naukovyi visnyk budivnytstva»*, T. 105, no. 3, pp. 75-81, 2021. doi.org/10.29295/2311-7257-2021-105-3-75-81.
- [8] DSTU-N B EN 1992-1-1:2010. Yevrokod 2. Proektuvannia zalizobetonnykh konstrukttsii. Chastyna 1-1. Zahalni pravyla i pravyla dlia sporud (EN 1992-1-1:2004, IDT).
- [9] S.M. Koliesnikov, "Nelineina metodyka rozrakhunku vohnestiikosti stryzhnevoho zalizobetonnoho elementu (balka) na diiu zghynalnoho momentu cherez rozrakhunok maksimalnoi nesuchoi zdatnosti yoho normalnoho pererizu na vyznachenyi moment chasu pry bud yakykh temperaturnykh vplyvakh", *Zbirnyk naukovykh prats «Naukovyi visnyk budivnytstva»*, T. 106, no. 4, pp. 107-115, 2021. doi.org/10.29295/2311-7257-2021-106-4-107-115.
- [10] DD ENV 1992-1-2:1996. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.2 General rules – Structural fire design – (together with United Kingdom National Application Document).
- [11] O.A. Dovzhenko, V.V. Pohrebnoi, "Harmonyzatsiya dyahrammy deformyrovanyia betona pry szhaty dlia prymerenyia v raschetakh zhelezobetonnykh elementov na osnove evropeiskykh norm", *Materyaly Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnycheskoi konferentsyy*. Mynsk: BNTU, 2017, pp. 56-65.
- [12] Fib Bulletin No. 38. Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling. State-of-art report, 2007. doi.org/10.35789/fib.BULL.0038.

THE FORMULA FOR THE COMPLETE STRESS-STRAIN DIAGRAM FOR COMPRESSIVE CONCRETE UNDER FIRE AND HIGH TEMPERATURE CONDITIONS

¹**Butenko S.V.**, Ph.D., Associate Professor,
svbusan87@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6083-7668

¹**Plahotnikova I.A.**, Ph.D., Associate Professor,
ira5657@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1986-4215

¹**Kolesnikov S.M.**, graduate student,
555ksn555@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2090-9647

¹*Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture*
St. Sumska, 40, Kharkiv, 61002, Ukraine

Abstract. The theory of calculating reinforced concrete structures for fire resistance in general is not fully developed. Among the calculation methods outlined in the design standards and divided into tabular data, simple and advanced methods are relatively developed in the first and second groups. But the advanced methods are not described at all, but have only basic requirements. The problems of developing advanced methods for calculating the fire resistance of reinforced concrete structures is due to: firstly, nonlinear strength, deformation, thermophysical and thermomechanical properties of concrete and reinforcing steel and their change with temperature; secondly, by non-linear temperature effects caused by a fire and, accordingly, by non-linear non-stationary processes of heat exchange, which as a result gives a non-linear distribution of heat fields in the volume or cross-section of the element.

One of the reasons that inhibits the development of refined methods for calculating the fire resistance of reinforced concrete structures, according to the authors of the current article, is the lack of a clear analytical description (formula) of the complete (including ascending and descending branches) stress-strain diagram for concrete, in fire conditions and at high temperatures. Such a formula must meet the requirements formulated and substantiated in previous theoretical studies.

The article is devoted to obtaining the formula for the complete stress-strain diagram for concrete compression, under fire conditions and at high temperatures. Obtaining the formula is based on the knowledge set forth in the design standards at normal temperatures and the authors' previous research, which becomes their logical continuation. The received formula was verified against the requirements formulated in previous studies and compared with experimental data. Analytical dependences for temperature coefficients were also obtained, and their comparison with the data contained in the design standards was performed.

The obtained results can be used both in the development of new fire resistance calculation methods, related to the refined ones, and in the existing ones, as an alternative to the generally known data. It is also possible to use it in calculation computer programs to describe the deformation of uniaxial compression of concrete at different temperatures and with a temperature gradient.

Key words: stress-strain diagram, concrete, high temperatures, fire.

Стаття надійшла до редакції 8.08.2022

**ПОРІВНЯННЯ РОБОТИ БАГАТОПОВЕРХОВИХ СТАЛЕВИХ КАРКАСІВ
ПРИ ПОЖЕЖІ ЗА РІЗНИХ ПОЧАТКОВИХ УМОВ ТА ЇХ ВПЛИВ
НА ЖИВУЧІСТЬ**

¹Дауров М.К., аспірант,
mk19daurov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6338-4326

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

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

Анотація. Проаналізовано дослідження, присвячені живучості при пожежі сталевих каркасів в багатоповерхових будівлях. Виявлено, що існуючі заходи посилення живучості суттєво збільшують металоємність каркасів. Не виявлено детального аналізу потенційних механізмів руйнування залежно від різних початкових умов. Виявлена необхідність в дослідженні напруженого стану елементів під час пожежі до першого руйнування та подальших потенційних механізмів руйнування для більш глибокого розуміння живучості. В даній публікації проаналізовано роботу плоских багатоповерхових сталевих каркасів під час пожежі. Побудовані графіки залежності коефіцієнту використання несучої здатності різних елементів каркасу залежно від часу.

Порівняно роботу каркасів при пожежі з різними вузлами примикання балок до колон та різним розташування джерела пожежі. Виявлено, що під час пожежі в балкових елементах каркасу напружений стан змінюється зі згинального на стиснуто-зігнутий. Встановлено, що елементи каркасу потрібно проектувати такими, в яких пластичні деформації з'являються раніше, ніж настає втрата місцевої стійкості. Необхідно проектувати перерізи за класифікацією Єврокоду, де є класифікація залежно від геометрії.

Порівняно роботу каркасів при пожежі з різними початковими запасами. Виявлено, що в жодному елементі каркасу температура до першого настання граничного стану не досягає 400°C, за якої починає зменшуватися межа текучості сталі. Встановлено, що на вогнестійкість каркасів більше впливає не зниження характеристик сталі, а розподіл зусиль.

Порівняно каркаси з жорсткими та шарнірними вузлами примикання з точки зору живучості та вогнестійкості. Встановлено, що каркаси з шарнірними вузлами є більш вогнестійкими, а з жорсткими – більш живучі при пожежі. Визначено спосіб збільшення часу до втрати живучості сталевих каркасів.

Ключові слова: живучість, пожежа, сталевий каркас, багатоповерхова будівля, прогресуюче руйнування, пластичні деформації.

Вступ. В умовах урбанізації в містах все більше зростає населення, що призводить до зменшення місця земельних ділянок для будівництва та збільшує потребу у багатоповерховому будівництві. Проте зі збільшенням поверховості збільшується і чутливість будівлі до різних загроз, які можуть призвести до її повного руйнування та великої кількості людських жертв. Багато сучасних досліджень в галузі будівельних конструкцій присвячено живучості, будівель, тобто їх здатності чинити опір повному руйнуванню після локального руйнування внаслідок загрози. Однією із загроз, що може спричинити руйнування багатоповерхової будівлі, є пожежа. Прикладами прогресуючого руйнування багатоповерхової будівлі внаслідок пожежі є пожежа в Сан-Паулу (Бразилія, 2018 р., рис. 1, а) та Мадрид (Іспанія, 2005 р. рис. 1, б). До того ж у вітчизняних нормах є вимога: всі об'єкти класу наслідків СС3 розраховувати на живучість, зокрема і на живучість при пожежі [1].

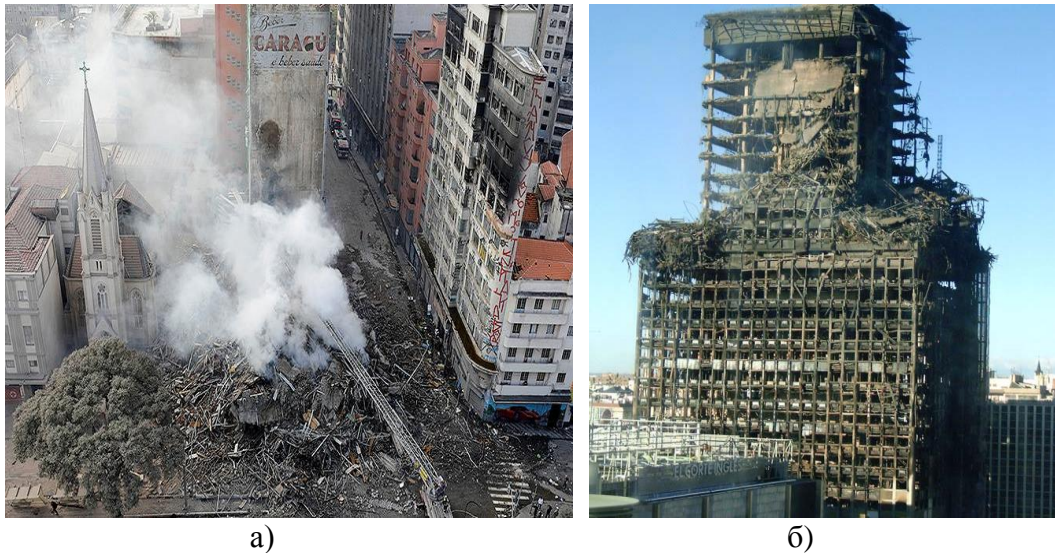


Рис. 1. Наслідки прогресуючого руйнування будівель від пожежі:
а – в Сан-Паулу; б – в Мадриді

Аналіз останніх досліджень. Раніше виконані дослідження живучості сталевих каркасів при пожежі можна поділити на 2 частини: присвячені *роботі каркасів при пожежі* та присвячені *заходам посилення живучості* цих каркасів. Дослідження [2-8] показують, що під час пожежі першими можуть руйнуватися перекриття каркасу, а не колони. Тому варто досліджувати різні механізми руйнування каркасів при пожежі з метою визначення і уникнення найбільш руйнівних.

В [8] було досліджено роботу елементів багатоповерхових сталевих каркасів при пожежі за розташування джерела пожежі в різних прольотах на різних поверхах. Для розглянутого каркасу було зокрема встановлено, що:

- при пожежі час до першого руйнування за сценарію пожежі в середньому прольоті більший, ніж у крайньому;
- за пожежі на вищому поверсі руйнування відбувається пізніше, ніж на нижчому;
- на нижчому поверсі колони більш схильні до того, щоб зруйнуватися раніше за балку, ніж на верхньому;
- в середньому прольоті балки більш схильні до того, щоб зруйнуватися раніше за колону, ніж у крайньому.

В [9] було досліджено вогнестійкість та живучість при пожежі сталевих каркасів з детальним моделюванням роботи різних компонентів вузлів примикання балок до колон. Було встановлено, що вузли можуть руйнуватися раніше, ніж елементи каркасу. Досліджений вплив вузлів на зусилля в елементах каркасів [10-11].

Вивчено роботу каркасів при пожежі, що спричинена землетрусом і поширюється на декілька поверхів та декілька прольотів одночасно [12]. В роботі [9] було встановлено, що розподіл зусиль так змінює напружений стан в сталевому каркасі, що після підбору перерізів під зусилля від цих навантажень металоємність каркасу збільшилась на 50% навіть з урахуванням того, що максимальне температурне навантаження склало 120°C при вогнезахисті R180. Це свідчить про те, що збільшення вогнезахисту є неефективним заходом посилення живучості сталевих каркасів при пожежі. В [8] показано, що перше руйнування при пожежі в сталевому каркасі може відбутися значно раніше за початок зменшення міцнісних характеристик сталі.

Були досліджені коефіцієнти запасу елементів сталевих каркасів та їх вплив на живучість каркасу [4-6]. В [13] наголошується, що коефіцієнт завантаженості в колонах має бути 0,25, щоб запобігти прогресуючому руйнуванню, що значно збільшує металоємність каркасу. Для посилення живучості при пожежі та сейсмостійкості рекомендується використовувати комбіновані аутригерні системи (superframe), що поєднують вертикальні та

горизонтальні аутригери по контуру рам каркасу [13].

Виходячи з результатів попередніх досліджень роботи сталевих каркасів при пожежі можна сказати, що це питання потребує більш системного дослідження та аналізу. Досліджені раніше заходи посилення живучості сталевих каркасів при пожежі потребують оптимізації. Необхідно глибше вивчити особливості розподілу зусиль та напружений стан конструкцій каркасу будівлі під час пожежі та досліджувати заходи з посилення живучості, які будуть ефективні та економічно доцільні водночас.

Задачі досліджень. В даних дослідженнях виконані наступні задачі:

- порівняти роботу сталевих каркасів при пожежі з різними вузлами примикання балок до колон;
- порівняти роботу сталевих каркасів при пожежі з різними початковими запасами;
- проаналізувати вплив зміни напруженого стану каркасів на їхню живучість при пожежі.

Матеріали та методика дослідження. Було проведено числове дослідження роботи плоскої сталеві рами при пожежі в одному з прольотів на одному з поверхів. Об'єктом дослідження є плоска рама, що складається з трьох прольотів (2 крайніх та середній) та трьох поверхів (нижній, середній, верхній) без вогнезахисту. Прольот балки прийнято – 7,2м. Висота поверху прийнята – 3,6м. Колони розкріплені із площини рами в рівні примикання балок, балки розкріплені із площини з кроком 2,4м. Крок рам – 6м. Завантаженість у балок та колон була прийнята однаковою – 50% з метою здійснення наочного порівняння зміни їх навантаженості в процесі пожежі. Бази колон прийнято з жорстким примиканням. Вузли примикання балки до колони – жорсткі та шарнірні. Були розглянуті по 2 сценарії пожежі: нижній поверх – крайній прольот, нижній поверх – середній прольот (рис. 2).

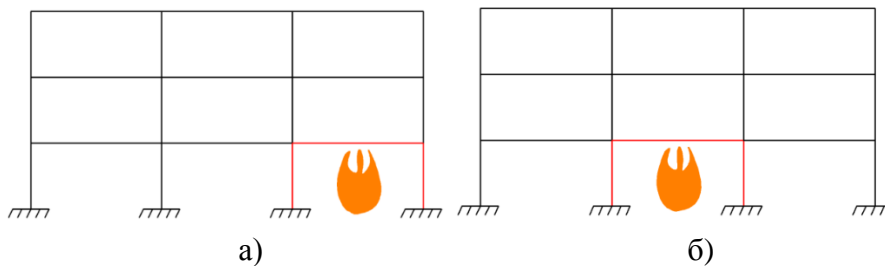


Рис. 2. Прийняті сценарії розрахункової пожежі для каркасу з жорстким приєднанням балок до колон:

а – нижній поверх – крайній прольот; б – нижній поверх – середній прольот

Навантаження були зібрані за ДБН В.1.2-2 «Навантаження і впливи» [14]. Розрахункова ситуація аварійна. На балки навантаження було прийнято $1\text{т/м}^2 \times 6\text{м} = 6\text{т/м}$. На колони було прийнято 35% вітрового характеристичного (згідно з рекомендацій UFC 4-023-03. Design of buildings to resist progressive collapse [15]) для м. Київ. Сталь елементів С255. Підбір та перевірка перерізів виконана за ДБН В.2.6-198 «Сталеві конструкції» [16]. Дія пожежі змодельована температурними навантаженнями, що були визначені за ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість [17].

Розрахунок на дію пожежі виконано нелінійний статичний, так як у пожежі не має фактору миттєвості як наприклад вибух, удар і т.д. Покроково з інтервалом в 30 секунд в нелінійній постановці (з урахуванням геометричної нелінійності) задавався приріст температури. Зміну міцнісних та деформативних характеристик сталі залежно від температури згідно ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 [17] (фізична нелінійність).

Покладені спрощення. При розрахунку прийнято, що температура розподіляється рівномірно по довжині елементу та по перерізу. Також припускається, що елементи рами не сприймають інших температурних дій крім пожежі. Вузли мають більший резерв несучої здатності, ніж елементи каркасу.

Результати досліджень. Результати розрахунку показані в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунків для каркасів

Сценарій	Вузли балок з колонами, чарунка пожежі	Час першого руйнування, с	Елемент	Температура нагрітої балки, °С	В межах/поза межами нагрітої чарунки	Фактор вичерпання несучої здатності
1	Жорсткі, крайній прольот нижній поверх	300	Крайня колона	229	В межах	Стійкість із площини згину
2	Жорсткі, середній прольот нижній поверх	330	Крайня балка	249	Поза межами*	Втрата місцевої стійкості поясу
3	Жорсткі, крайній прольот нижній поверх	120	Крайня балка	105	В межах	Місцева стійкість поясу та місцева стійкість стінки
4	Шарнірні, крайній прольот нижній поверх	480	Крайня колона	310	В межах	Стійкість із площини згину
5	Шарнірні, середній прольот нижній поверх	600	Середня колона	374	В межах	Стійкість із площини згину
6	Шарнірні, крайній прольот нижній поверх	660	Крайня колона	262	В межах	Стійкість із площини згину
7	Шарнірні, крайній прольот нижній поверх	420	Крайня колона	259	В межах	Стійкість із площини згину

* – руйнування відбувалося на поверсі, де була пожежа

За сценарію 1 середня колона на початку пожежі була більш завантажена, але внаслідок згину, що спричинений термічним розширенням балки, швидше завантажувється та руйнується крайня колона (рис. 3). З рис. 4 можна побачити, що на графіку завантаженості балки відбувається стрибок. Це пояснюється тим, що коли в балці збільшується поздовжня сила за рахунок дії температурного навантаження, приведений відносний ексцентриситет m_{ef} зменшується нижче значення 20, за якого балка розраховується як стиснуто-зігнутий, а не згинальний елемент. На графіку зміни коефіцієнту використання несучої здатності за різними факторами (рис. 5) можна побачити, що стрибок відбувається для коефіцієнту використання несучої здатності за місцевою стійкістю поясу.

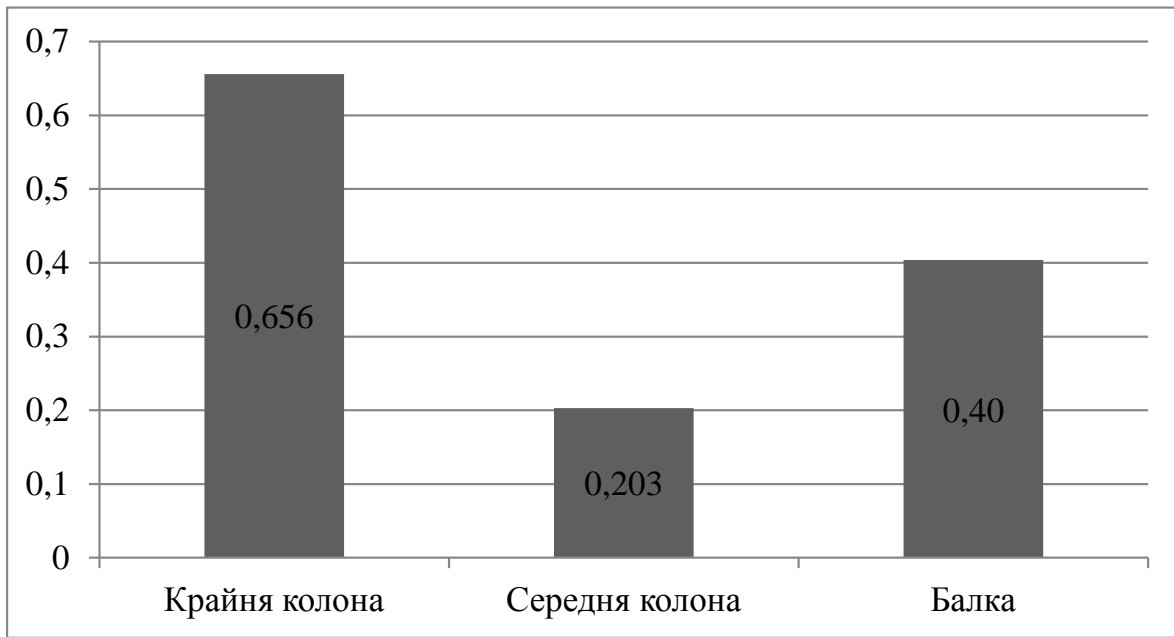


Рис. 3. Приріст коефіцієнту використання несучої здатності елементів для сценарію 1

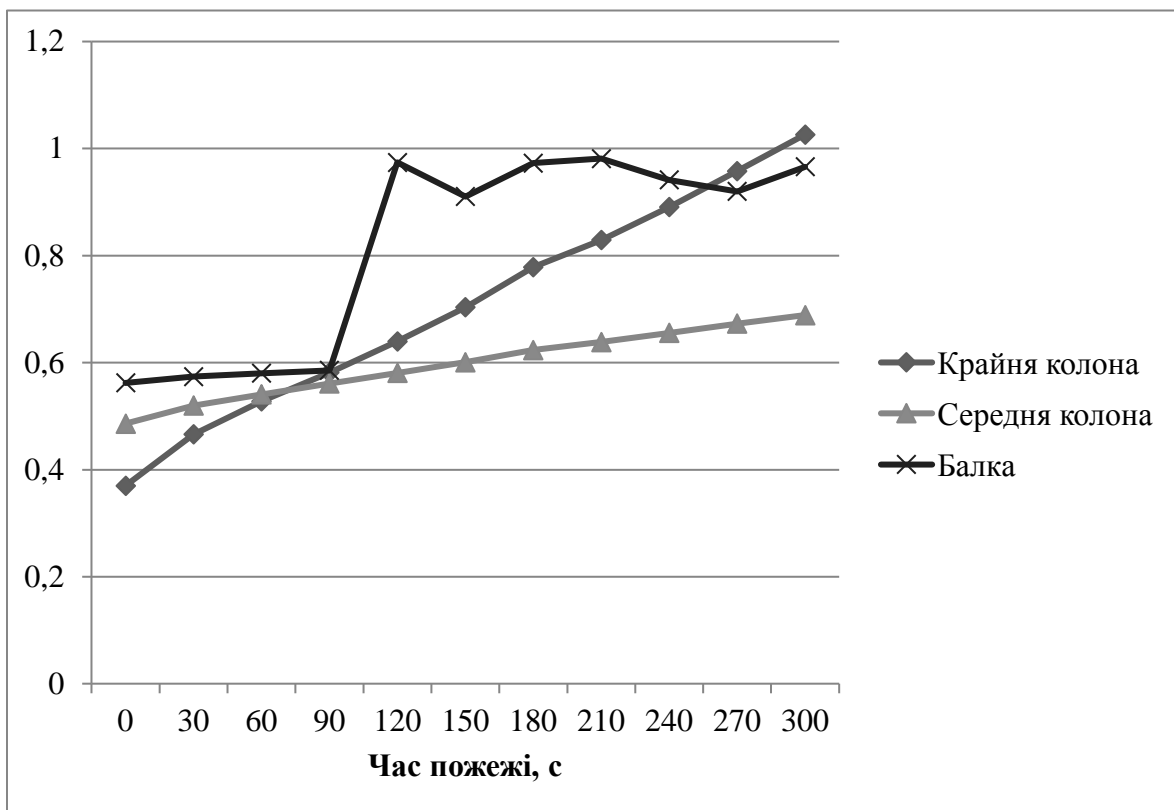


Рис. 4. Графік зміни коефіцієнту використання несучої здатності під час пожежі для сценарію 1

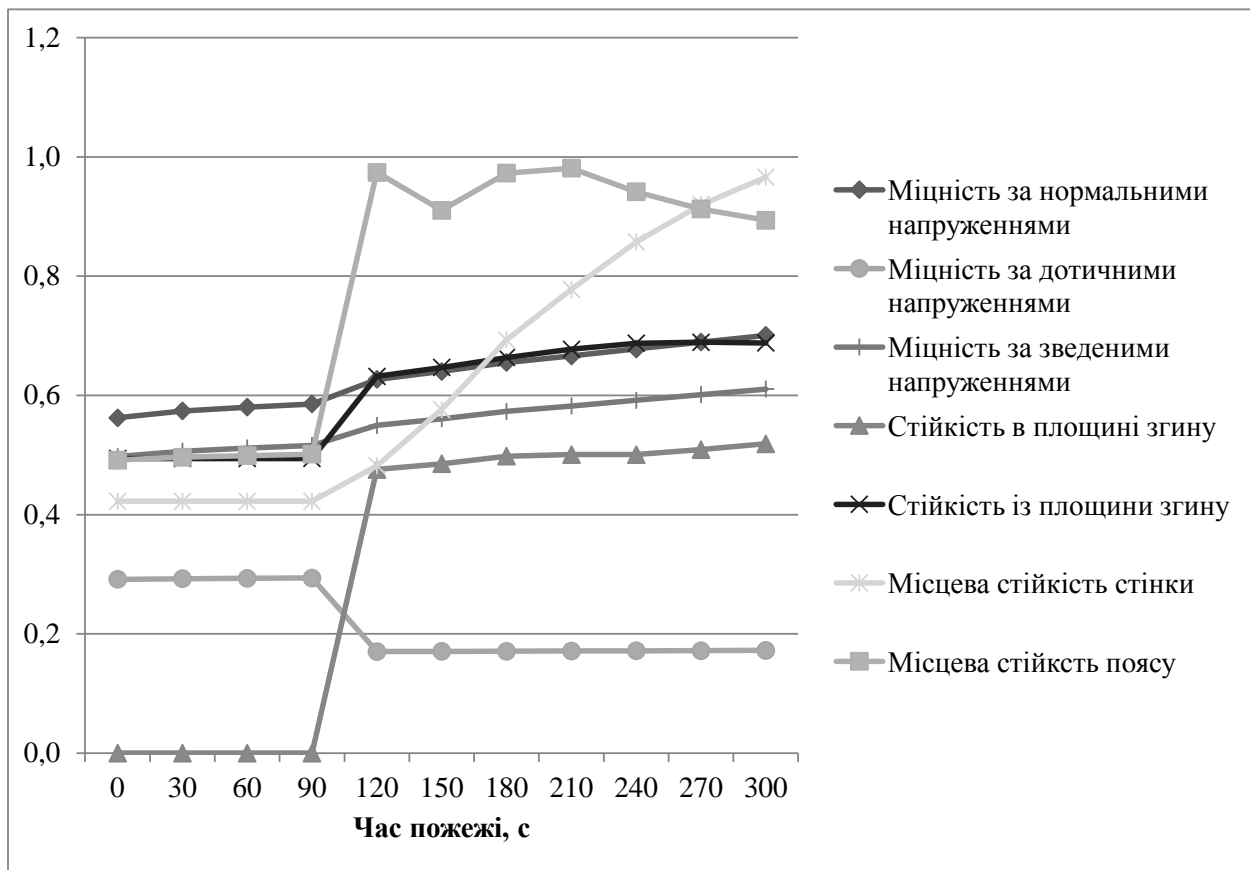


Рис. 5. Зміна коефіцієнтів використання несучої здатності нагрітої балки за різними факторами для сценарію 1

З рис. 6 можна побачити, що в середньому прольоті на нижньому поверсі (сценарій 2) на відміну від крайнього швидше завантажується балка, ніж колона. Але руйнується першою не середня балка (з безпосередньою дією вогню), а крайня, хоча в ній стрибок в коефіцієнті використання несучої здатності відбувається пізніше, ніж у середній (рис. 7). Більш ранне руйнування саме крайньої балки, а не середньої, на яку діє вогонь, пояснюється меншим значенням m_{ef} , що зумовлене меншим відношенням моменту до поздовжньої сили (рис. 8).

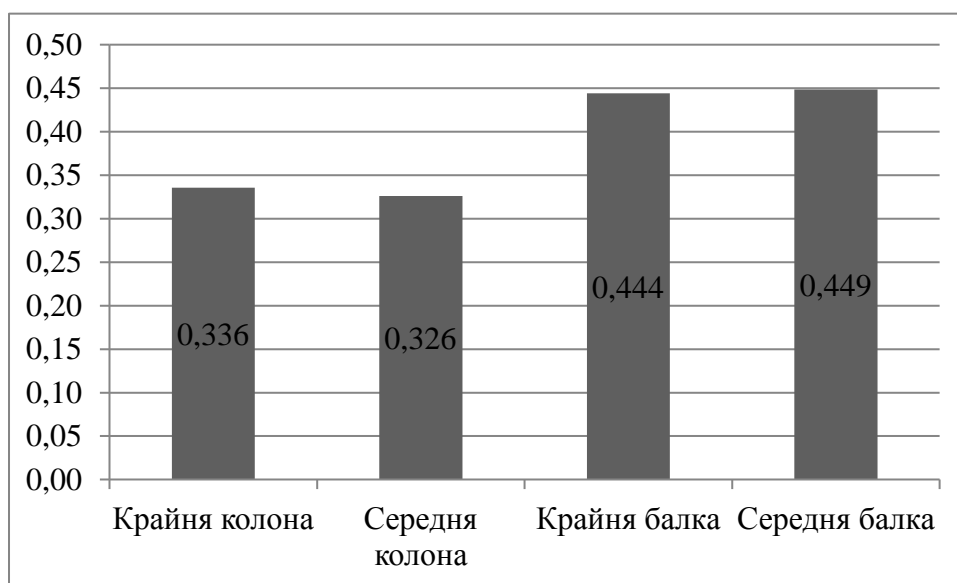


Рис. 6. Приріст коефіцієнту використання несучої здатності елементів для сценарію 2

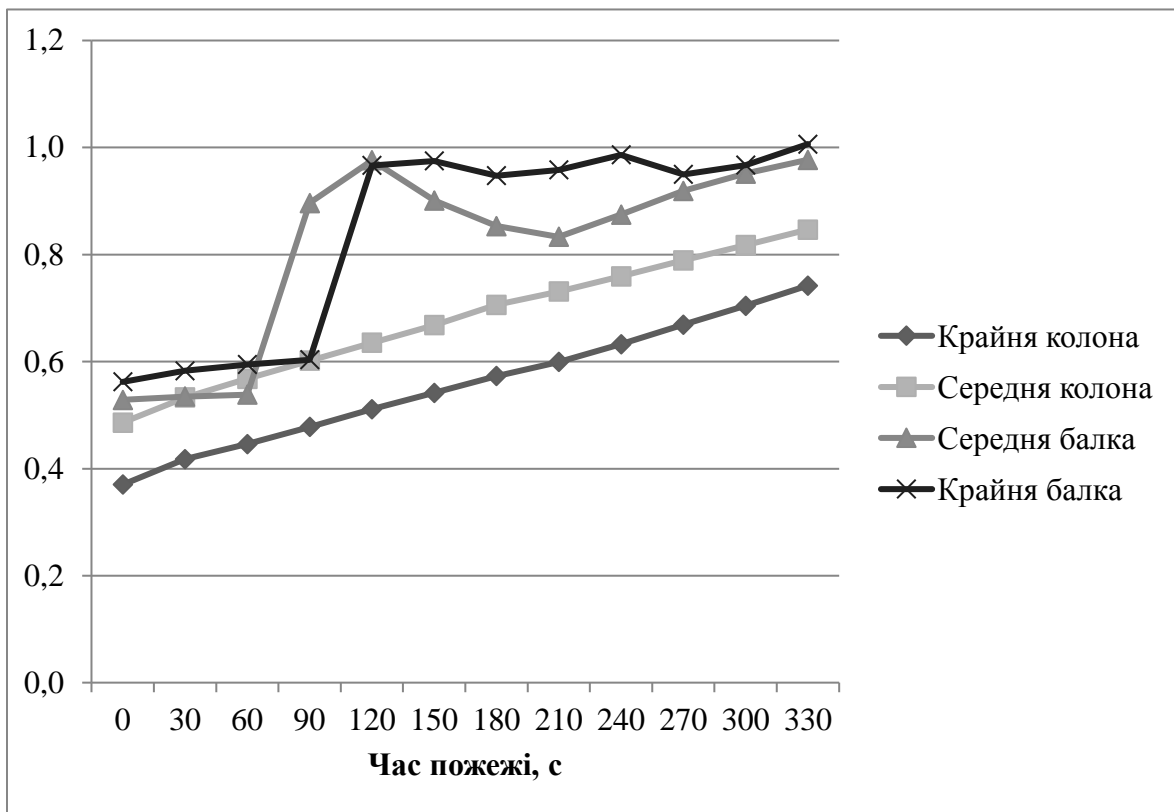


Рис. 7. Графік зміни коефіцієнту використання несучої здатності для сценарію 2

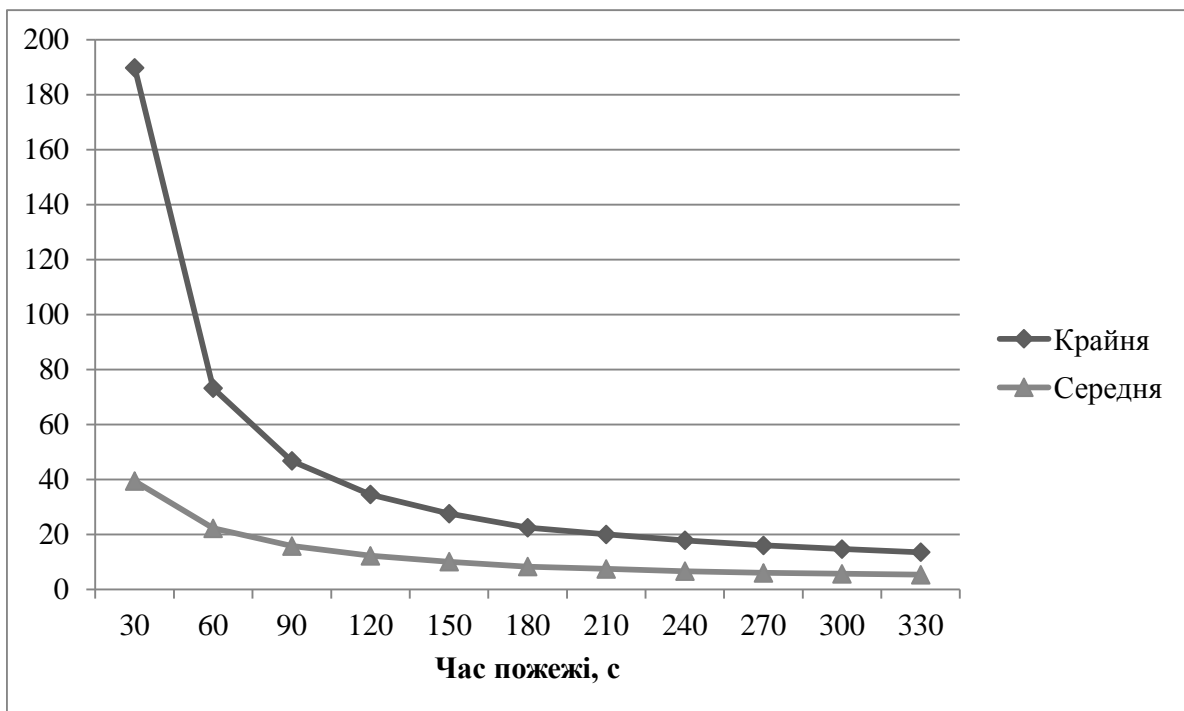


Рис. 8. Графік зміни величини m_{ef} в балці для сценарію 2

Для сценарію 1 було виконано аналогічний розрахунок, але балка була прийнята 2-го класу (згідно [16] з допущенням обмежених пластичних деформацій). Результати розрахунку показані в табл. 1 та рис. 9.

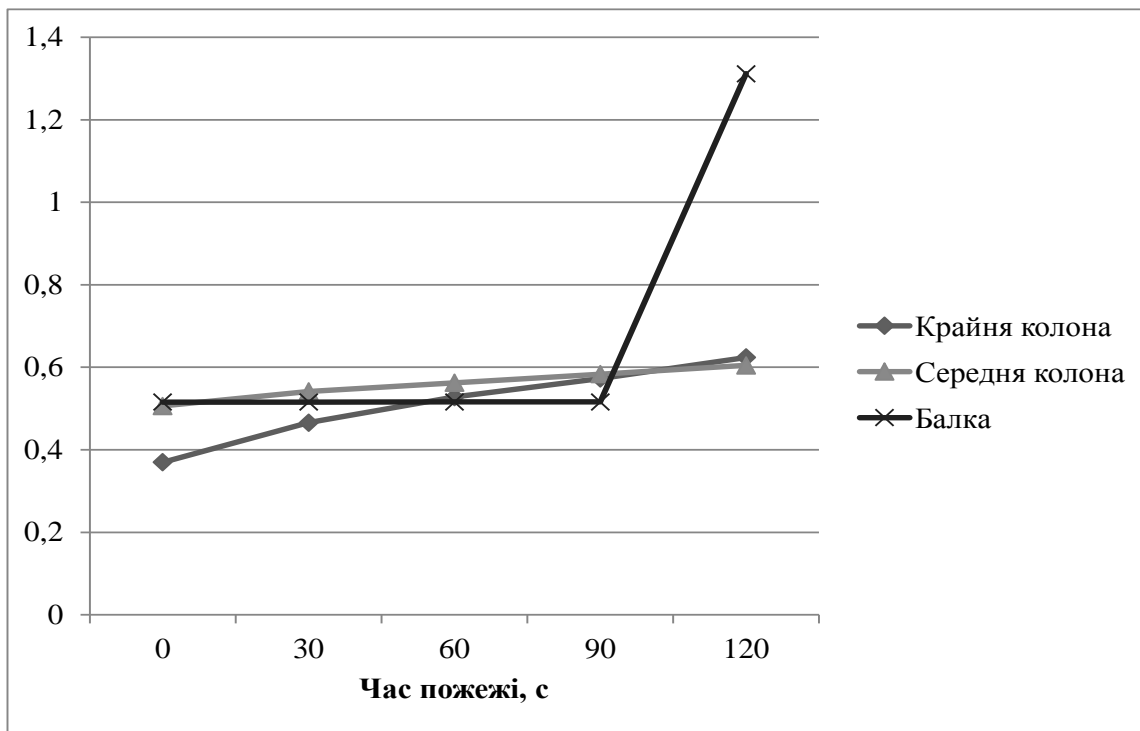


Рис. 9. Графік зміни коефіцієнту використання несучої здатності для сценарію 3

Як можна побачити з графіків на рис. 9, для рами з балкою, прийнятою 2-го класу руйнування настає ще раніше, ніж для рами з балкою 1-го класу та стрибок в графіку завантаженості більший (79,6% в порівнянні з 45%). На відміну від аналогічного випадку, де першою руйнується крайня колона, руйнування настає в балці.

Для рам із шарнірним примиканням балок до колон були розглянуті по 2 сценарії пожежі: нижній поверх – крайній прольот, нижній поверх – середній прольот (рис. 10).

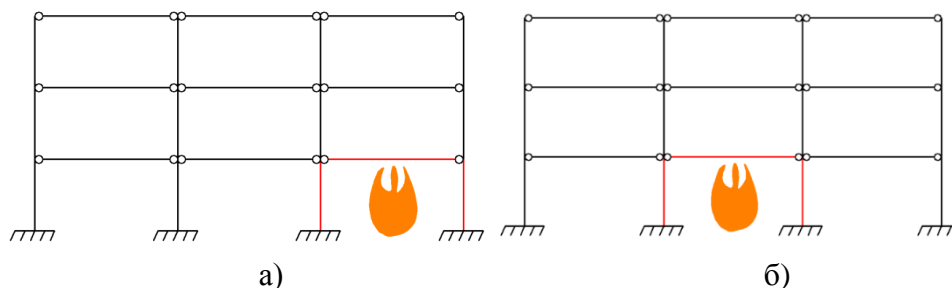


Рис. 10. Сценарії пожежі для шарнірних балок:

а – нижній поверх – крайній прольот; б – нижній поверх – середній прольот

Результати розрахунку показані в табл. 1. З рис. 11 можна побачити, що на графіку коефіцієнту використання несучої здатності як крайньої, так і середньої балки відбувається стрибок, як і в рамі з жорсткими вузлами. З рис. 12 можна побачити, що крайня колона завантажується швидше, ніж балка та середня колона, незважаючи на те, що на початку була менш завантаженою, як і в аналогічному випадку в рамі з жорсткими вузлами. Нагріта балка в завантажується повільніше, ніж в рамі з жорсткими вузлами (приріст 0,264 в порівнянні з 0,46), колона – приблизно однаково (приріст 0,64 в порівнянні з 0,656), що вказує більшу схильність до першого руйнування колони, ніж у рамі з жорсткими вузлами. Поздовжня сила у балці, що нагрівається, на 18% менша, ніж в аналогічному випадку в жорсткій рамі, незважаючи на те, що балка з шарнірними вузлами має більшу жорсткість. Колона першою руйнується, як і в рамі з жорсткими вузлами, ніж балка. Час руйнування довший (480с=8хв в порівнянні з 300с=5хв) за рахунок меншої поздовжньої сили в балці.

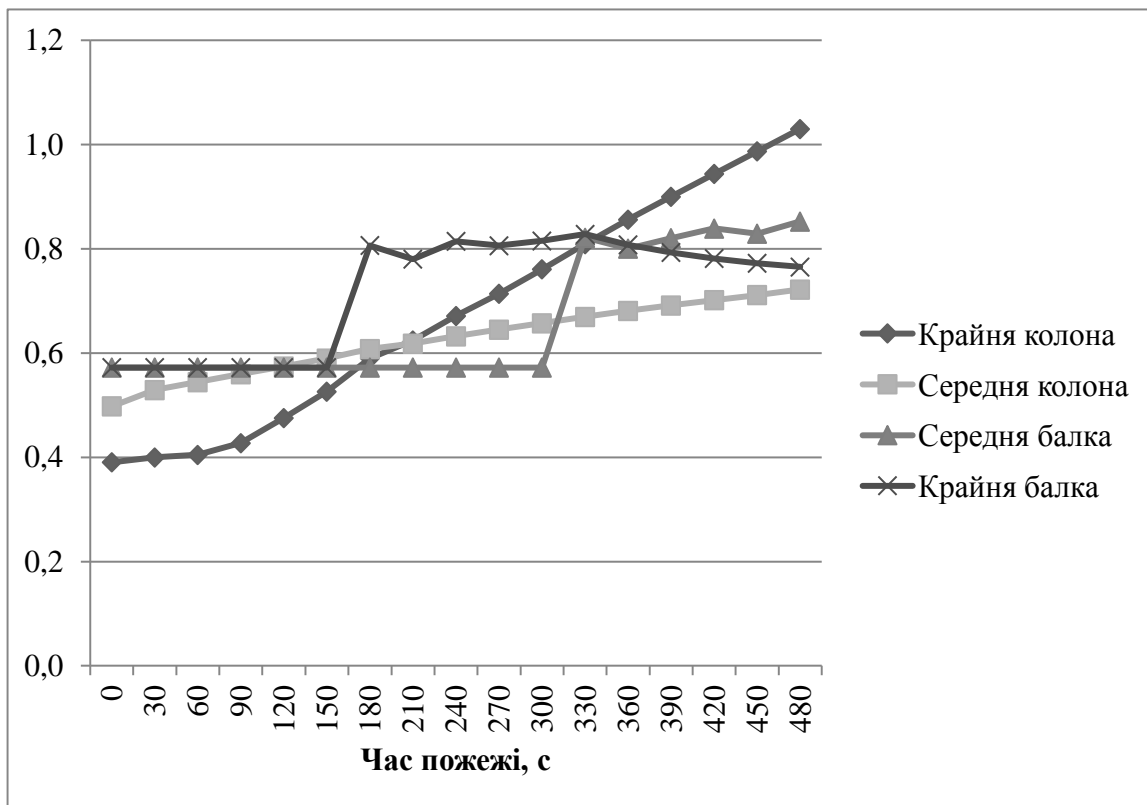


Рис. 11. Графік зміни коефіцієнту використання несучої здатності для сценарію 4

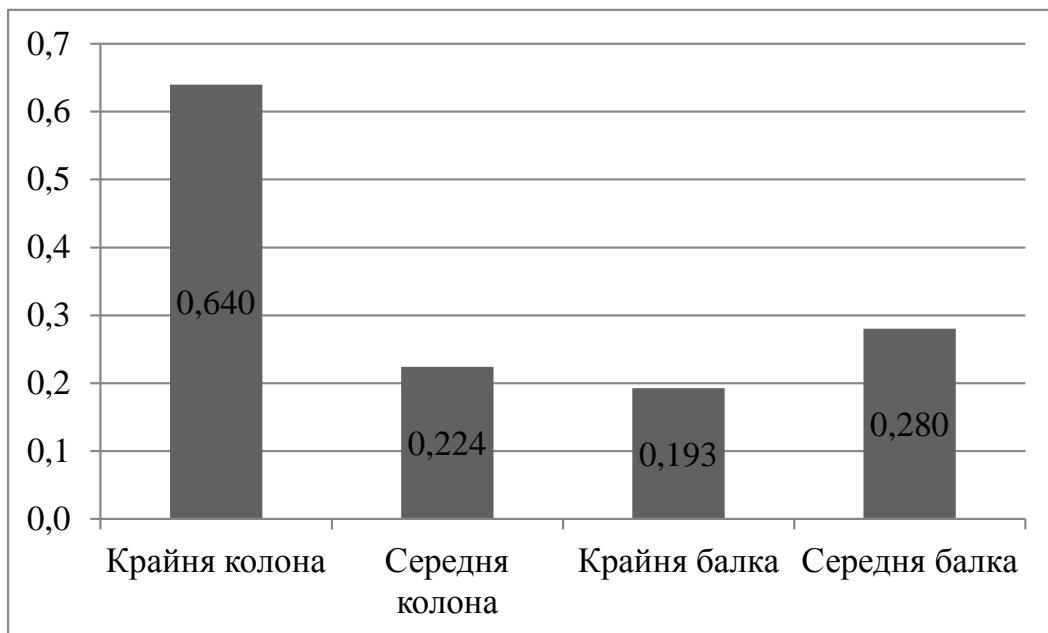


Рис. 12. Приріст коефіцієнту використання несучої здатності для сценарію 4

Як можна побачити з рис. 13, величина стрибку графіку навантаженості балки в рамі з шарнірними вузлами менша (з $\sim 0,5$ до $\sim 0,8$), ніж в рамі з жорсткими (з $\sim 0,5$ до $\sim 0,95$). Колони за пожежі в середньому прольоті навантажуються швидше, ніж балки, на відміну від аналогічного випадку в рамі з жорсткими вузлами. Крайня колона навантажується швидше, ніж середня, але середня руйнується раніше через більшу початкову навантаженість (рис. 14).

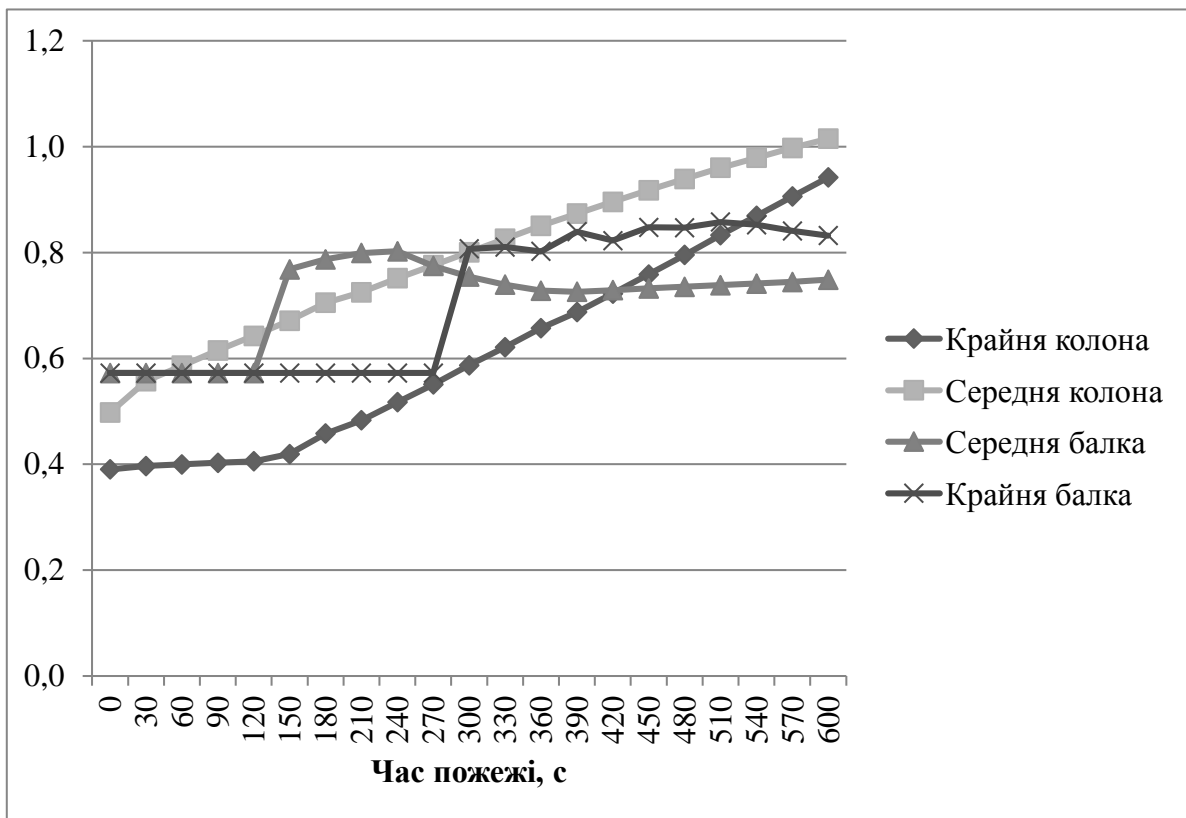


Рис. 13. Графік зміни коефіцієнта використання несучої здатності для сценарію 5

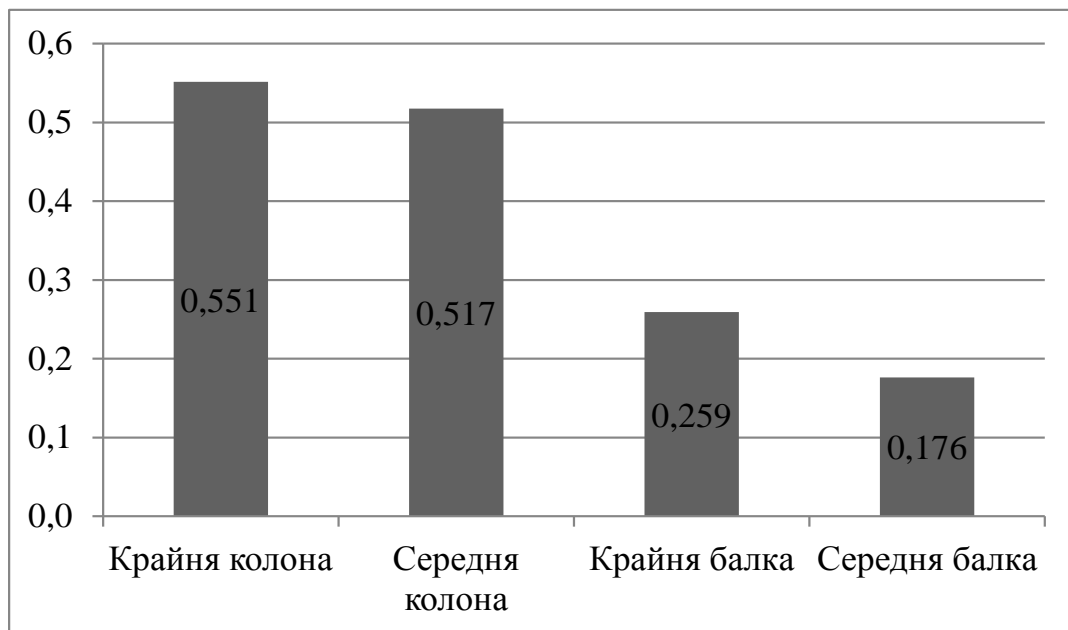


Рис. 14. Приріст коефіцієнту використання несучої здатності для сценарію 5

Порівняння сталевих каркасів із жорстким та шарнірним з'єднанням балок до колон з точки зору живучості проведено на базі вищезазначених та раніше вивчених [18-21] досліджень, і наведено в табл. 2.

Для рам із шарнірним примиканням балок до колон із завантаженістю у балок та колон - 25% був розглянутий один сценарій пожежі: нижній поверх – крайній прольот (рис. 15).

Таблиця 2 – Порівняння сталевих каркасів

Критерій порівняння	Вузли приєднання балок до колон	
	Жорсткі	Шарнірні
Одинична живучість	Більша, при «вилученні» колони динамічне зусилля частково сприймає балка в опорних перерізах та вузлах	Менша, необхідно застосовувати в'язі для жорсткості каркасу та більші перерізи аутригерів для сприйняття динамічного зусилля при «вилученні» колони
Вогнестійкість	Менша, час першого руйнування менший	Більша, час першого руйнування більший
Живучість при пожежі	Більша, менш схильні до першого руйнування колон, після першого руйнування балки зусилля розподіляється певний час на колони	Менша, більш схильні до першого руйнування колон, потребують аутригерів

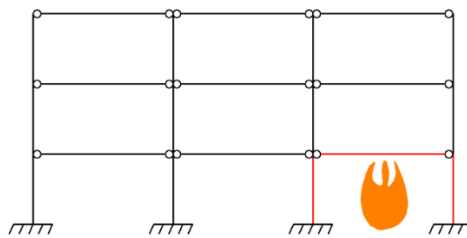


Рис. 15. Сценарій пожежі для каркасу із завантаженістю 25% з шарнірними балками: нижній поверх – крайній прольот

Результати розрахунку показані в табл. 1. Принципових відмінностей у зміні коефіцієнтів несучої здатності в різних елементах немає у порівнянні з рамою із завантаженістю 0,5 (рис. 16). Передбачувано, що час руйнування в рамі з більшим запасом міцності більший, ніж в рамі з меншим запасом (660с в порівнянні з 480с). Температура елементів рами, що нагрівається, на час руйнування менша в рамі із завантаженістю 0,25 на 13-15%, ніж в рамі із завантаженістю 0,5. Це пояснюється тим, більші перерізи мають менші коефіцієнти перерізу і нагріваються повільніше.

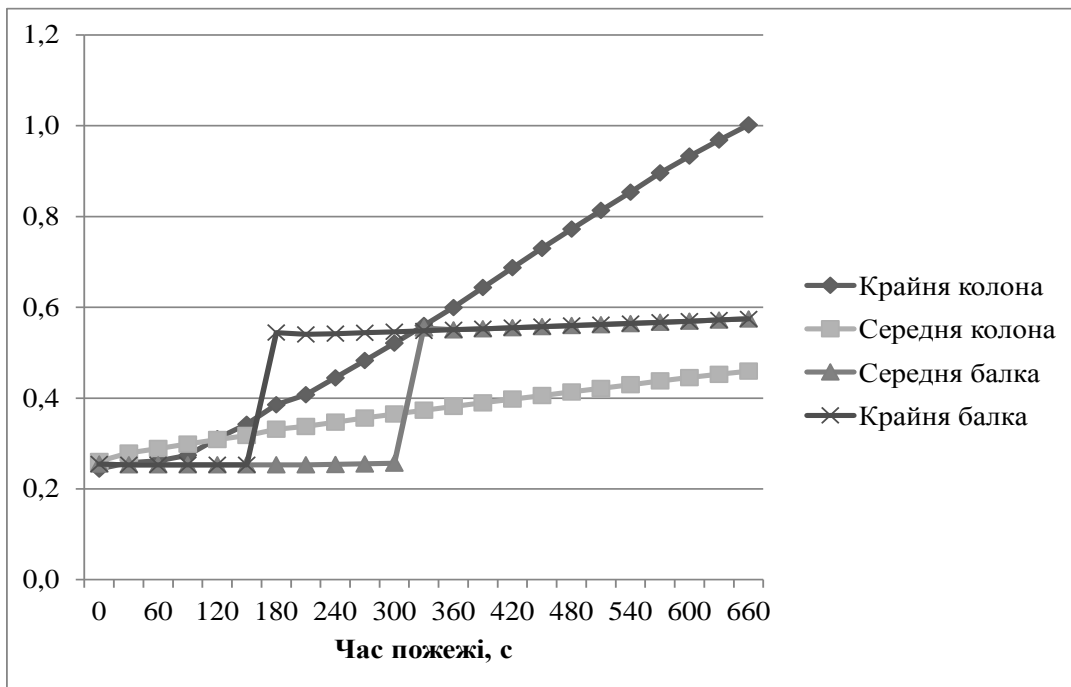


Рис. 16. Графік зміни коефіцієнта несучої здатності для сценарію 6

Для рам із шарнірним примиканням балок до колон із завантаженістю у балок та колон – 75% був розглянутий один сценарій пожежі: нижній поверх – крайній прольот (рис. 17).

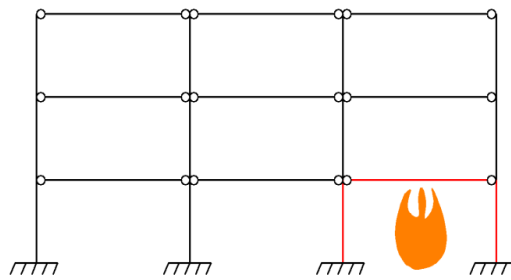


Рис. 17. Сценарій пожежі для рам із завантаженістю 75% з шарнірними балками: нижній поверх – крайній прольот

Результати розрахунку показані в табл. 1. Виходячи з графіка зміни коефіцієнта несучої здатності (рис. 18), можна сказати, що крайня колона руйнується першою, незважаючи на те, що інші елементи в нагрітій чарунці мають вдвічі більший початковий коефіцієнт несучої здатності.

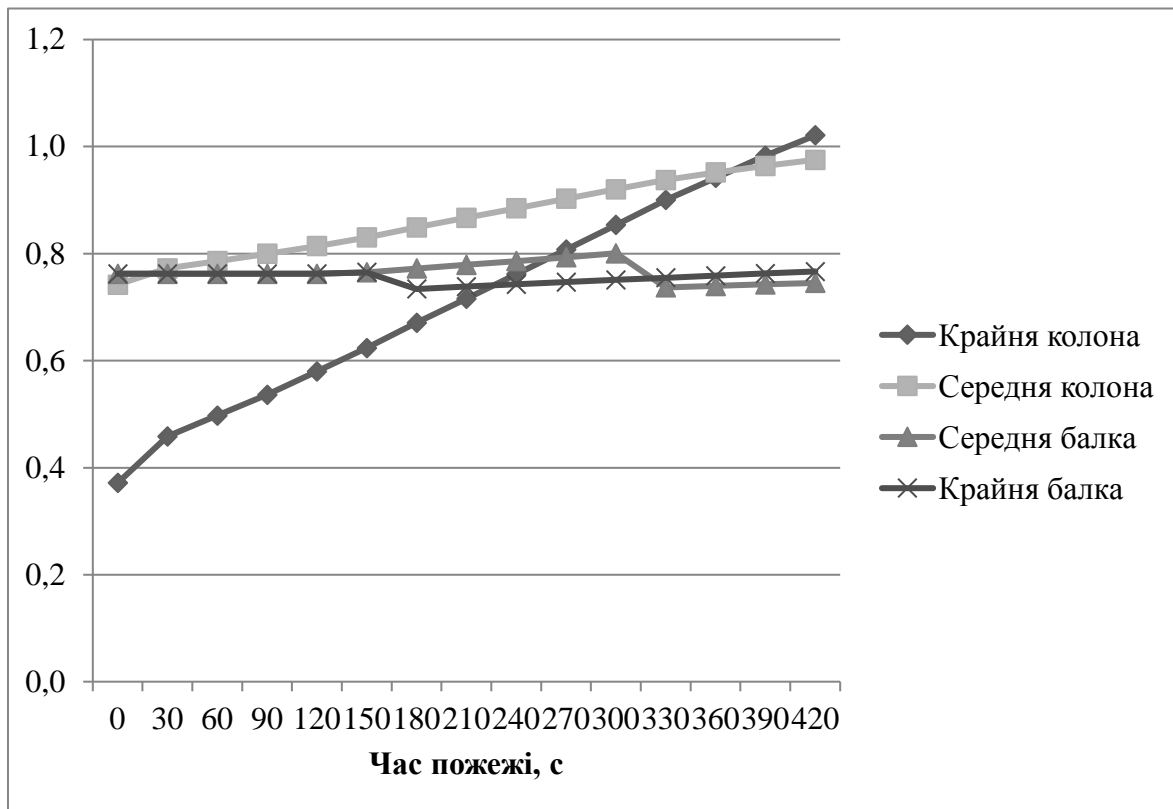


Рис. 18. Графік зміни коефіцієнта несучої здатності для сценарію 7

На відміну від всіх інших сталевих каркасів, розрахованих на дію пожежі, на графіку зміни коефіцієнта несучої здатності балочних елементів не спостерігається стрибка, незважаючи на те, що клас балки було прийнято 1-й, як і для попередніх випадків. Було визначено клас перерізів балок за Eurocode 3 [22] для 3-х варіантів пожежі з різними початковими умовами (табл. 3).

Таблиця 3 – Визначення класу балки за Eurocode 3 [22]

Сценарій	Початкові умови	Переріз балки	Клас балки за ДБН [15]	Клас балки Eurocode 3[22] (стінка)	Клас балки Eurocode 3[22] (пояс)
1	Жорстка рама, нижній поверх крайній прольот	2 – 250×12, 520×12	1 клас	$520/12=43,3 \leq 72 \times (235/240)^{0,5} = 71,2$ – 1 клас	$119/12=9,92 \leq 9 \times (235/240)^{0,5} = 13,86$ – 3 клас
2	Жорстка рама, нижній поверх крайній прольот	2 – 340×14, 520×12	2 клас	$520/12=43,3 \leq 72 \times (235/240)^{0,5} = 71,2$ – 1 клас	$163/14=11,64 \leq 9 \times (235/240)^{0,5} = 13,86$ – 3 клас
7	Шарнірна рама, нижній поверх крайній прольот	2 – 180×20, 480×16	1 клас	$480/16=30 \leq 72 \times (235/240)^{0,5} = 71,2$ – 1 клас	$80/20=4 \leq 9 \times (235/240)^{0,5} = 8,91$ – 1 клас

Було виявлено, що для сценарію 1 з балкою 1-го класу (що працює в межах пружних деформацій) і для сценарію 2 з балкою 2-го класу (в якій допускається розвиток обмежених пластичних деформацій) за ДБН [15] за класифікацією Eurocode 3 [22] обидві належать до 3-го класу (працюють в пружній області, а напруження досягають межі текучості тільки у крайніх волокнах). Саме тому в обох випадках на рис. 4, 10 відбуваються стрибки при переході від згинального до стиснуто-зігнутого напруженого стану. При чому балка, яка за ДБН [15] відноситься до 2-го класу і мала б більш плавно переходити у стиснуто-зігнутий стан, має ще більший стрибок, ніж балка 1-го класу за ДБН [15]. Це явище пояснюється тим, що балка сценарію 2 за Eurocode 3 [22] ближча до 4-го класу (втрата місцевої стійкості настає до досягнення границі текучості в одній або кількох частинах перерізу), ніж балка сценарій 1. А балка в сценарії 7, яка є 1-го класу за ДБН [15] (що працюють в межах пружних деформацій) за Eurocode 3 [22] належить до 1 класу (перерізи, в яких може утворюватися повний шарнір пластичності). І це є причиною того, що на графіку (рис. 20) стрибку не відбувається.

Порівнюючи роботу сталевих каркасів з різним коефіцієнтом використання несучої здатності при пожежі, можна зробити наступні висновки:

- час першого руйнування в рамках з меншими резервами несучої здатності коротший, а в каркасах з більшими – довший;
- в усіх випадках відбувалося перше руйнування одного й того ж елемента за тим же фактором;
- температура руйнування може бути меншою в каркасі з більшими резервами несучої здатності;
- ані в каркасі з великими резервами несучої здатності (0,25), ані в рамі маленькими (0,75) температура жодного з елементів не досягає 400°C, за якої починає знижуватися межа текучості сталі;
- в каркасі із завантаженістю 0,75 не відбувається стрибку на графіку коефіцієнта несучої здатності балки при переході від згинального в стиснуто-зігнутий напружений стан.

Висновки. В даній статті була проаналізована робота сталевих каркасів при пожежі за різних початкових умов таких як: типи вузлів примикання балок до колон, початковий коефіцієнт використання несучої здатності, допущення/недопущення розвитку обмежених пластичних деформацій в балках. Каркаси із шарнірними вузлами схильні до більш раннього руйнування колон, аніж балок. Якщо виходити з того, що безпечніший механізм руйнування буде у випадку першого руйнування балки, а не колони, то з точки зору живучості при пожежі більш ефективними є каркаси з жорсткими вузлами. Але час першого руйнування в каркасах з шарнірним примиканням балок більший, тобто вогнестійкість є вищою. Щоб більш детально проаналізувати живучість каркасів при пожежі, необхідно дослідити роботу каркасів від першого настання граничного стану до втрати живучості. При дослідженні

роботи при пожежі каркасів із різними початковими коефіцієнтами використання несучої здатності виявлено, що в жодному елементі каркасу температура до першого настання граничного стану не досягає 400°C, за якої починає зменшуватися межа текучості сталі. Це свідчить про те, що на несучу здатність елементів сталевих каркасів при пожежі більше впливає розподіл зусиль, ніж зниження характеристик сталі.

В балкових елементах при пожежі від термічного розширення відбувається перехід від згинального до стиснуто-зігнутого напруженого стану. При розрахунку стиснуто-зігнутих елементів допускаються розвиток обмежених пластичних деформацій. Щоб при чисельному розрахунку запобігти стрибку коефіцієнту використання несучої здатності при пожежі, переріз балок необхідно проектувати саме з урахуванням обмежених пластичних деформацій за класифікацією Єврокоду 3 [22] (де клас залежить від геометрії). Допущення пластичних деформацій збільшує час першого руйнування в каркасі і відповідно час втрати живучості, але вимагає додаткових резервів несучої здатності.

Література

1. Дауров М. К., Білик А.С. Огляд вимог сучасних нормативних документів із розрахунку сталевих каркасів багатопверхових будівель на опір прогресуючому руйнуванню. *Містобудування та територіальне планування*. 2019. №70. С. 175-186.
2. Sun R., Burgess I., Huang Zh., Dong G.. Progressive failure modelling and ductility demand of steel beam-to-column connections in fire. *Engineering Structures*. 2015. №89. P. 66-78.
3. Richard Liew, J.Y., Tang, L.K., Holmaas, T., Choo, Y.S. Advanced analysis for the assessment of steel frames in fire. *Journal of Constructional Steel Research*. 1998. № 47. P. 19-45.
4. Jiang, J., Li, G.Q., Usmani, A.S. Progressive collapse mechanisms of steel frames exposed to fire. *Advances in Structural Engineering*. 2014. № 17(3). P. 381-398.
5. Jiang, B.H., Li, G.Q., Usmani A.S. Progressive collapse mechanisms investigation of planar steel moment frames under localized fire. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. № 115. P. 160-168.
6. Sun, R.R., Huang, Z.H., Burgess I. Progressive Collapse Analysis of Steel Structures under Fire Conditions. *Engineering Structures*. 2012. №34. P. 400-413.
7. Lange, D., Roben, C., and Usmani, A.S. Tall Building Collapse Mechanisms Initiated by Fire: Mechanisms and Design Methodology. *Engineering Structures*. 2012. №36. P. 90-103.
8. Daurov M.K., Bilyk A.S. Investigation of changes in steel frames stress state in fire and influence on its vitality. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles*. 2022. № 108. P. 325-336.
9. Daurov M.K., Bilyk A.S. Providing of the vitality of steel frames of high-rise buildings under action of fire. *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*. 2019. № 102. P. 62-68.
10. Білик С. І., Білик А. С., Ключніченко Т. О., Джанов Л. В.. Визначення коефіцієнта розрахункової довжини стержня шарнірно закріпленого в нижній частині *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2018. №. 2. С. 162-169.
11. Білик С.І., Білик А.С., Цюпин Є.І., Нужний В.В., Ключніченко Т.О. Удосконалення методики розрахунку зварних швів фланцевих вузлових з'єднань із врізаними ребрами жорсткості просторових сталевих ферм з труб. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2020. № 7. С. 57-65.
12. Memari M. Performance of steel structures subjected to fire following earthquake: PhD dissertation. Colorado State University. Colorado, 2016. 211p.
13. Wada A., Ohi K., Suzuki H., Sakumoto Y., Fushimi M., Kamura H., Murakami Y., Sasaki M., Fujiwara K. Study of Structural Redundancy of High-Rise Steel Building Due to the Effect of Heat and Loss of Vertical Structural Members. 2004.

14. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. [Чинний від 2007-01-01]. К.: Мінбуд України, 2006. 77 с. (Національний стандарт України).
15. UFC 4-023-03. United Facilities Criteria. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. Department of Defense USA, 2009. 227p. (UFC)
16. ДБН В.2.6–198:2014. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування. [Чинний від 2015-01-01]. К.: Мінрегіон України, 2014. 199 с. (Національний стандарт України).
17. ДСТУ–Н Б EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. [Чинний від 2013-07-01]. К.: Мінрегіон України, 2010. 106 с. (Національний стандарт України).
18. А. С. Білик, А. І. Коваленко. Порівняння методів розрахунку металевих каркасів висотних будівель на одиничну живучість. *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського*. 2015. № 16. С. 30-39.
19. А. С. Білик, А. І. Коваленко. Динамічні зусилля в колонах сталевих каркасів багатопверхових будівель при розрахунку на одиничну живучість. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2016. № 32. С. 304-309.
20. Коваленко А.І. Особливості проектування багатопверхових будівель з одиничною живучістю. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. № 63. С. 62-66.
21. А. С. Білик, А. І. Коваленко. Сучасні методи моделювання прогресуючого руйнування будівель і споруд. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*. 2016. № 87. С. 35-41.
22. EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings: EN 1991-1. Brussels: Management Centre, 2005. 93 p. (European Standard).

References

- [1] M. K. Daurov, A. S. Bilyk, "Oglyad vimog suchasnikh normativnikh dokumentiv iz rozrakhunku stalevikh karkasiv bagatopoverkhovikh budivel' na opir progresuyuchomu rujnuvannyu", *Mistobuduvannya ta teritorial'ne planuvannya*, no. 70, pp. 175-186, 2019.
- [2] R. Sun, I. Burgess, Zh. Huang, G.Dong, "Progressive failure modelling and ductility demand of steel beam-to-column connections in fire", *Engineering Structures*, no. 89, pp. 66-78, 2015.
- [3] J.Y. Richard Liew, L.K. Tang, T. Holmaas, Y.S. Choo, "Advanced analysis for the assessment of steel frames in fire", *Journal of Constructional Steel Research*, no. 47, pp. 19-45, 1998.
- [4] J. Jiang, G.Q. Li, A.S. Usmani, "Progressive collapse mechanisms of steel frames exposed to fire", *Advances in Structural Engineering*, no. 17(3), pp. 381-398, 2014.
- [5] B.H. Jiang, G.Q. Li, A.S. Usmani, "Progressive collapse mechanisms investigation of planar steel moment frames under localized fire", *Journal of Constructional Steel Research*, no. 115, pp. 160-168, 2015.
- [6] R.R. Sun, Z.H. Huang, I. Burgess, "Progressive Collapse Analysis of Steel Structures under Fire Conditions", *Engineering Structures*, no. 34, pp. 400-413, 2012.
- [7] D. Lange, C. Roben, A.S. Usmani, "Tall Building Collapse Mechanisms Initiated by Fire: Mechanisms and Design Methodology", *Engineering Structures*, no. 36, pp. 90-103, 2012.
- [8] M.K. Daurov, A.S. Bilyk, "Investigation of changes in steel frames stress state in fire and influence on its vitality", *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles*, no. 108, pp. 325-336, 2022.

- [9] M.K. Daurov, A.S. Bilyk, "Providing of the vitality of steel frames of high-rise buildings under action of fire", *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles*, no. 102, pp. 62-68, 2019.
- [10] S.I. Bilyk, A.S. Bilyk, T.O. Kliushnychenko, L.V. Dzhhanov, "Vyznachennia koefitsiienta rozrakhunkovoi dovezhyny sterzhnia sharnirno zakriplenoho v nyzhnii chastyni", *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, no. 2, pp. 162-169, 2018.
- [11] S.I. Bilyk, A.S. Bilyk, Ye.I. Tsiupyn, V.V. Nuzhnyi, T.O. Kliushnichenko, "Udoskonalennia metodyky rozrakhunku zvarnykh shviv flantsevykh vuzlovykh ziednan iz vrizanymy rebramy zhorstkosti prostorovykh stalevykh ferm z trub", *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, no. 7, pp.57-65, 2020.
- [12] M. Memari, "Performance of steel structures subjected to fire following earthquake", PhD dissertation, Colorado State University, Colorado, 2016.
- [13] A. Wada, K. Ohi, H. Suzuki, Y. Sakumoto, M. Fushimi, H. Kamura, Y. Murakami, M. Sasaki, K. Fujiwara, *Study of Structural Redundancy of High-Rise Steel Building Due to the Effect of Heat and Loss of Vertical Structural Members*, 2004.
- [14] DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2006.
- [15] UFC 4-023-03. United Facilities Criteria. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. Department of Defense USA, 2009.
- [16] DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2014.
- [17] DSTU-N B EN 1993-1-2:2010. Yevrokod 3. Proektuvannia stalevykh konstruksii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstruksii na vohnestiikist. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2010.
- [18] A.S. Bilyk, A.I. Kovalenko, "Porivnyannia metodiv rozrakhunku metalevikh karkasiv visotnykh budivel' na odinichnu zhivuchist'", *Zbirnik naukovikh prac' Ukrain's'kogo institutu stalevikh konstrukcij imeni V. M. Shimanovs'kogo*, no. 16, pp. 30-39, 2015.
- [19] A.S. Bilyk, A.I. Kovalenko, "Dinamichni zusillya v kolonakh stalevikh karkasiv bagatopoverkhovikh budivel' pri rozrakhunku na odinichnu zhivuchist'", *Resursoekonomni materiali, konstrukcii, budivli ta sporudi*, no. 32, pp. 304-309, 2016.
- [20] A.I. Kovalenko, "Osoblivosti proektuvannia bagatopoverkhovikh budivel' z odinichnoyu zhivuchistyu", *Visnik Odes'koï derzhavnoï akademii budivnictva ta arkhitekturi*, no. 63, pp. 62-66, 2016.
- [21] A.S. Bilyk, A.I. Kovalenko, "Suchasni metodi modelyuvannia progresuyuchogo ruzhnuvannia budivel' i sporud", *Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya : Sozdanie vysokotekhnologicheskikh ehkokompleksov v Ukraine na osnove koncepcii sbalansirovannogo (ustojchivogo) razvitiya*, no. 87, pp. 35-41, 2016.
- [22] EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings: EN 1991-1. Brussels: Management Centre, 2005.

MULTI-STOREY STEEL FRAMES IN FIRE STRESS STATE COMPARISON OF UNDER DIFFERENT INITIAL CONDITIONS AND THEIR INFLUENCE ON VITALITY

¹**Daurov M.K.**, postgraduate student,
mk19daurov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6338-4326

¹**Bilyk A.S.**, Ph.D, Assistant Professor,
artem.bilyk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9219-920X

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

Abstract. The researches devoted multi-storey buildings steel frames fire vitality was analyzed. It was found that the existing measures to increase the viability significantly increase the frames metal content. No detailed analysis of potential destruction mechanisms depending on different initial conditions has been identified. The need to research the frame elements stress state during a fire before the first destruction and subsequent potential mechanisms of destruction for a better vitality understanding. This publication analyzes the stress state of 2d multi-storey steel frames during a fire. Various frame elements load capacity factor dependence graphs on time are done.

The frames operation in case of fire with different beam-to-column connections and different fire source locations are compared. It was found that during a fire in the beam frame elements, the stress state changes from bending to compressed-bent. It has been established that the frame elements should be designed in such a way that plastic deformations appear before local buckling occurs. It is necessary to design sections according to the Eurocode classification, where there is a classification depending on the geometry.

The frames operation in case of fire with different initial load capacity factor is compared. It was found that in no the frame element temperature before the first onset of the limit state does not reach 400°C, at which the steel yield strength begins to decrease. It is established that the frames fire resistance of is more influenced not by the steel characteristics reduction, but by the forces distribution.

The frames with rigid and hinged beam-to-column connections are compared in terms of vitality and fire resistance. It is established that frames with hinged connections are more fire-resistant, and with rigid connections – more vitally to fire. The method of increasing the time to steel frame vitality loss is determined.

Keywords: vitality, fire, steel frame, multi-storey building, progressive collapse, plastic deformation.

Стаття надійшла до редакції 19.07.2022

ДИСПЕРСНО-АРМОВАННИЙ ЛИТИЙ КЕРАМЗИТОБЕТОН НА МЕХАНОАКТИВОВАНОМУ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТІ

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

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

²**Щербина О.С.**, к.т.н.,
olegito4ka@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8180-4665

²*ТОВ «Баутех-Україна»*
вул. Хімічна 4/1, м. Одеса, 65000, Україна

Анотація. В роботі розглядаються властивості дисперсно-армованого литого керамзитобетону на механоактивованому шлакопортландцементі з добавкою полікарбонатного суперпластифікатора Супер-ПК. Експериментальними дослідженнями встановлено можливість отримання легких бетонів на основі високорухомих легкообетонних сумішей з діаметром розпливу конуса не менше 50 см.

Експериментально підтверджено, що гідрофобізація керамзитового гравію сприяє збільшенню розпливу конуса бетонної суміші, а також збільшує життєздатність бетонної суміші. Показано доцільність механоактивації шлакопортландцементу в присутності Супер-ПК для отримання легких бетонів з підвищеними характеристиками по морозостійкості, стиранию та ударній міцності.

Наведено результати досліджень, які свідчать про те, що введення базальтової фібри в шлакопортландцемент разом з механоактивацією в'язучого дозволяє знизити стирання бетону з 0,44 до 0,13 г/см², а також підвищити ударну міцність бетону майже в 2 рази (в порівнянні з контролем). Запропонований комплекс рецептурно-технологічних впливів дозволяє забезпечити морозостійкість бетону не нижче 350 циклів поперемінного заморожування та відтавання.

Встановлено, що механоактивація в'язучого викликає підвищення міцності бетону в 3-х денному віці з 11,3 до 16,2 МПа, тобто більше ніж на 40% в порівнянні з контролем. Введення базальтової фібри в кількості 1% від маси в'язучого забезпечує зростання міцності бетону на 10-15%. Спільний вплив на шлакопортландцемент механоактивації, добавки полікарбонатного Супер-ПК і базальтової фібри викликає підвищення міцності бетону в 28-ми денному віці (в порівнянні з контролем) з 11,3 до 29,5 МПа, тобто більше ніж в 2,5 рази.

В цілому, сумісне використання перерахованих рецептурно-технологічних факторів забезпечує підвищення основних фізико-механічних характеристик легкого бетону.

Ключові слова: керамзитобетон, механоактивація, базальтова фібра, полікарбонатний суперпластифікатор, стирання, морозостійкість, ударна міцність.

Вступ. Одним з основних напрямків впровадження прогресивних методів будівництва є застосування литевої технології, яка дозволяє різко знизити трудомісткість та енергоємність процесу ущільнення бетонної суміші, підвищити рівень механізації робіт, значно покращити умови праці за рахунок зниження шумових та вібраційних впливів. Особливо актуальною проблемою при цьому є отримання легких бетонів з високими показниками міцності та довговічності. Більш того, високі темпи будівництва об'єктів вимагають інтенсивного набору міцності бетону [1]. Більш інтенсивний набір міцності бетону може бути здійснений шляхом цілеспрямованої зміни структури цементної матриці як за рахунок активації зерен цементу в умовах інтенсивних гідродинамічних впливів на них, так і за рахунок модифікації ПАР. Можливість прискорення процесів структуроутворення набуває особливого значення

для монолітних бетонів, що твердіють в умовах майданчика.

Управління структуроутворенням цементного каменю в бетоні та отримання матеріалів заданої якості ґрунтується на оптимізації технологічних процесів їх виготовлення. Це, в свою чергу, передбачає встановлення залежностей, що визначають вплив на міцність легкого бетону рецептурних і технологічних чинників [2, 3].

Останнім часом робляться спроби застосування дисперсного армування цементної матриці за допомогою базальтових волокон [4]. Базальтові волокна істотно знижують ризик деформації цементного тісту (2-6 годин після укладання), зменшують небезпеку утворення усадочних тріщин на ранній стадії твердіння до 90% [5-7].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Легкі бетони є універсальним матеріалом для огорожувальних і несучих конструкцій, влаштування підлог житлових і промислових будівель, підстилаючого шару автомобільних доріг і аеродромів. Маючи відносно низьку середню щільністю легкі бетони мають цілу низку переваг перед важкими бетонами: зниження витрат на перевезення бетонної суміші, поліпшені теплотехнічні та звукоізоляційні характеристики бетону та ін. Застосування таких бетонів дозволяє знизити масу конструктивних елементів будівель до 30%, що забезпечує підвищення низки техніко-економічних показників виробництва. В якості пористого заповнювача для легкого бетону в основному застосовується керамзитовий гравій, що має порівняно низьку насипну щільність 400...800 кг/м³ [8].

У роботі наводяться результати досліджень бетонів на цементній матриці, армованої базальтовими волокнами [9, 10]. Введення базальтового волокна дозволяє виготовляти конструкції складної конфігурації, підвищує зносостійкість бетону, зменшує загальну вагу конструкцій [11, 12].

У запропонованій роботі вирішення питання підвищення фізико-механічних властивостей литого керамзитобетону досягається введенням базальтової фібри в шлакопортландцемент. Забезпечення розпливу конуса бетонної суміші в діапазоні 45-50 см дозволяє різко знизити трудомісткість та енергоємність процесу укладання бетонної суміші, підвищити рівень механізації робіт, а також значно покращити умови праці за рахунок зниження шумових та вібраційних впливів [13, 14].

Метою роботи є отримання дисперсно-армованого литого керамзитобетону на механоактивованому шлакопортландцементі з добавкою полікарбоксилатного суперпластифікатора з поліпшеними механічними характеристиками, а саме: міцність на стиск, стиранисть та ударна стійкість.

Для досягнення поставленої мети було поставлено такі завдання:

- дослідити вплив гідрофобізації керамзитового гравію на рухливість та життєздатність керамзитобетонної суміші;
- дослідити вплив базальтової фібри на фізико-механічні властивості керамзитової фібробетону на механоактивованому портландцементі з додаванням доменного шлаку.

Матеріали та методи дослідження. Основним об'єктом досліджень було обрано литі керамзитобетонні суміші, для приготування яких в якості в'язучого використовувався шлакопортландцемент. Експериментально встановлено, що добавка доменного шлаку в кількості 45% забезпечує найбільше значення коефіцієнта використання в'язучого, тому в подальших дослідженнях використовувався портландцемент з добавкою 45% меленого доменного шлаку (ДСТУ Б.В. 2.7 – 46:2010 ШПЦ III-A) [15].

Досліджувався вплив механоактивації в'язучого в присутності суперпластифікатора Супер-ПК і концентрації базальтової фібри в ньому на механічні характеристики керамзитобетону, що твердіє в нормальних умовах. Базальтова фібра представляє собою волокна довжиною 12 мм, діаметром 20 мкм. Для зниження водопоглинання базальтова фібра попередньо оброблялася кремнійорганічним гідрофобізатором ГКЖ-11. Витрата базальтового волокна варіювалася у кількості від 0% до 1% маси в'язучого.

Дослідження проводилися за стандартним 3-х факторним планом, що містить 15 експериментальних точок. Незалежними рецептурно-технологічними факторами було прийнято:

$X_1 - 450 \pm 100 \text{ кг/м}^3$ – кількість в'язучого;

$X_2 - 1 \pm 0,5\%$ – кількість суперпластифікатора Супер-ПК;

$X_3 - 0,5 \pm 0,5\%$ – кількість базальтової фібри.

Як заповнювач застосовувалися кварцовий пісок з $M_{кр} = 2.2$ і керамзитовий гравій, попередньо оброблений гідрофобізатором ГКЖ-11. Витрата кварцового піску коливалася в діапазоні від 727 до 812 $кг/м^3$, керамзитового гравію – від 630 до 715 $л/м^3$. Підвищена витрата кварцового піску (у порівнянні з традиційним складом бетону його витрата збільшена на 10-20%) пов'язана з необхідністю отримання високорухливої бетонної суміші.

Приготування бетонної суміші здійснювалося як за роздільною (з застосуванням механоактивації в'язучого в трибоактиваторі), так і за традиційною технологіями. При приготуванні бетонних сумішей за роздільною технологією, суспензія в'язучого, попередньо отримана спільним змішуванням послідовно добавлених в швидкісний трибозмішувач води, суперпластифікатора Супер-ПК, шлакопортландцементу і базальтової фібри, змішувалася з піском і керамзитовим гравієм в традиційному бетонозмішувачі примусової дії. Традиційна технологія передбачала приготування бетонних сумішей аналогічних складів у тихохідному бетонозмішувачі примусової дії без попередньої активації в'язучого.

Рухливість бетонної суміші визначалася розпливом конуса Абрамса. Для цього перевернутий конус заповнювався свіжоприготовленою бетонною сумішшю без ущільнення. Не пізніше 90 секунд після заповнення конус піднімався вертикально вгору. Рухливість бетонної суміші в кожному рядку плану експерименту (як за роздільною так і за традиційною технологією) приймалася рівною 50 см. Задана рухливість суміші досягалася коригуванням кількості води замішування в кожному рядку плану. Експериментально встановлено, що така рухливість легкобетонної суміші не вимагає вібрації при її укладанні. Досить невеликих механічних зусиль для забезпечення горизонтальної поверхні бетонної суміші.

Результати досліджень. Представляв інтерес з'ясувати однорідність розподілу керамзитобетонної суміші по висоті виробу. Для цієї мети використовувався пустотілий циліндр висотою 100 см в який укладалася свіжоприготовлена бетонна суміш. Після закінчення 3-х днів твердіння бетонний циліндр розрізався на 5 частин однакової висоти, рис. 1.

Проведені дослідження свідчать про високу однорідність керамзитобетону по висоті циліндра (рис. 2). Так, для керамзитобетону на механоактивованому в'язучому різниця в середній густині нижнього та верхнього зразків не перевищує 2,5-3%. Дещо вище різниця в середній густині між нижнім і верхнім зразками (4,5-5%) спостерігається для керамзитобетону на в'язучому, яке не піддавалося механоактивації. На нашу думку, це пов'язано як з особливістю складу бетонної суміші, так і з відсутністю вібрації при її укладанні. Відомо, що віброущільнення [8] сприяє спливанню зерен керамзитового гравію як найлегшого компонента бетонної суміші.

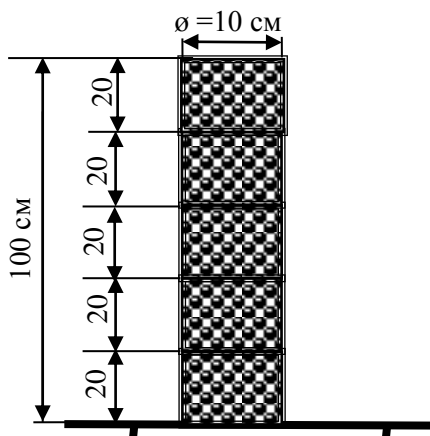


Рис. 1. Бетонна суміш у вертикальному пустотілому циліндрі

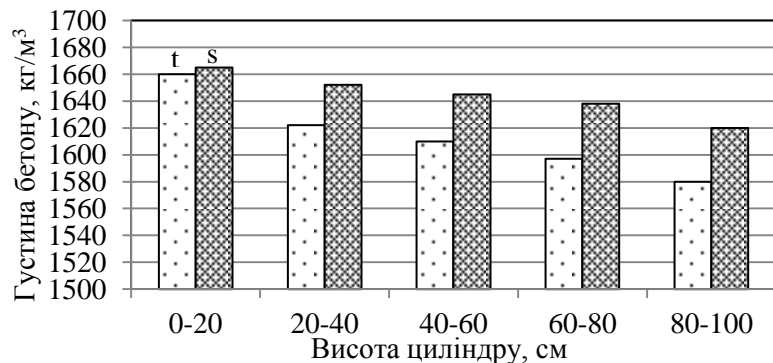


Рис. 2. Зміна середньої густини литого керамзитобетону по висоті циліндра:

t – традиційна технологія; s – роздільна технологія

Бетон у віці 28-ми днів нормального твердіння піддавався випробуванням на стиск, стирання, ударну міцність і морозостійкість. Вплив рецептурних факторів на міцність керамзитобетону у віці 3-х, 7-и та 28-и днів (індекс 3, 7 і 28 відповідно) для приготовленого за роздільною (індекс «s») та традиційною (індекс «t») технологіями описують наведені нижче експериментально-статистичні моделі:

$$f_{ck.cube3}^s = 14,4 + 3,6x_1 - 0,7x_1^2 + 0,1x_1x_2 + 0,9x_2 - 0,3x_2^2 + 0,1x_2x_3 + 0,8x_3 - 0,4x_3^2 \quad (1)$$

$$f_{ck.cube3}^t = 10,1 + 2,5x_1 - 0,4x_1^2 + 0,1x_1x_2 + 0,7x_2 - 0,2x_2^2 + 0,1x_2x_3 + 0,6x_3 - 0,3x_3^2 \quad (2)$$

$$f_{ck.cube7}^s = 22,5 + 5,4x_1 - 0,5x_1^2 + 1,4x_2 - 0,8x_2^2 + 0,3x_2x_3 + 1,3x_3 - 0,9x_3^2 \quad (3)$$

$$f_{ck.cube7}^t = 18,7 + 4,7x_1 - 0,9x_1^2 + 1,3x_2 - 0,2x_2^2 + 0,1x_2x_3 + 0,9x_3 - 0,8x_3^2 \quad (4)$$

$$f_{ck.cube28}^s = 22,7 + 5,9x_1 - 0,1x_1^2 + 0,1x_1x_2 - 0,1x_1x_3 + 1,5x_2 - 0,5x_2^2 + 0,1x_2x_3 + 1,1x_3 \quad (5)$$

$$f_{ck.cube28}^t = 20,8 + 5,7x_1 - 0,7x_1^2 + 0,1x_1x_2 - 0,3x_1x_3 + 5,7x_2 - 0,3x_2^2 + 1,0x_3 \quad (6)$$

Аналіз моделей показує, що міцність бетонів приготовлених за роздільною технологією вище міцності бетонів, приготовлених за традиційною технологією (за весь досліджуваний період твердіння) на 10-30%.

Експериментально встановлено, що міцність бетонів, суміші яких готувалися за роздільною технологією, на 3 день твердіння в 1,5 рази вище, ніж у контрольних зразків (в'яжуче механоактивації не піддавалося). У подальшому швидкість набору міцності керамзитобетону на механоактивованому в'яжучому сповільнюється і до 28-ми денного віку приріст міцності в порівнянні з контролем не перевищує 10-15% (рис. 3).

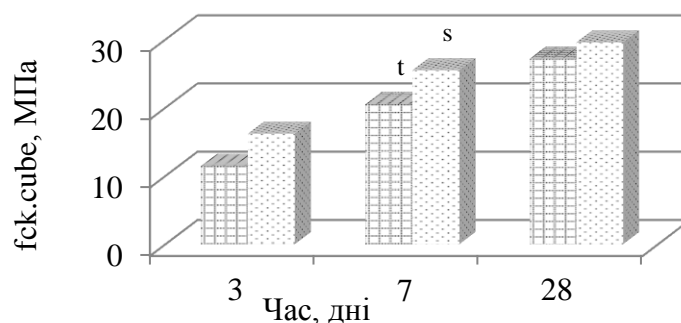


Рис. 3. Вплив терміну твердіння на кінетику набору міцності керамзитобетону складу: шлакопортландцемент – 550 кг/м³; пісок – 727 кг/м³; кер. гравій₅₋₁₀ – 385 л/м³; кер. гравій₁₀₋₂₀ – 245 л/м³; В/Ц_{PT} = 0,42; В/Ц_{TT} = 0,43; СПК – 1,5%; фібра – 1%
t – традиційна технологія; s – роздільна технологія

Графічна інтерпретація моделі (5), що описує вплив рецептурних факторів на міцність бетонів, що твердіють у нормальних умовах на механоактивованому в'яжучому, представлена на рис. 4.

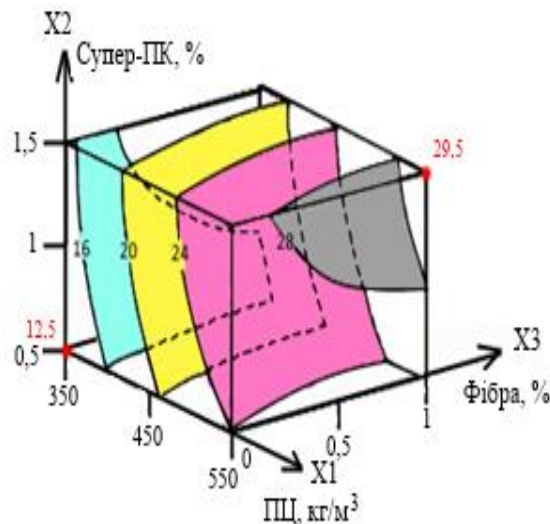


Рис. 4. Вплив рецептурних факторів на міцність бетону (МПа), виготовленого за роздільною технологією

Аналіз графічних залежностей свідчить про значний вплив витрати в'язучого на міцність бетону. Зі збільшенням вмісту в'язучого від 350 до 550 кг/м^3 міцність бетону підвищується з 17,8 до 29,5 МПа, тобто більш ніж в 1,5 рази.

Слід відмітити вплив на міцність бетону кількості суперпластифікатора Супер-ПК. Так, збільшення його концентрації від 0,5 до 1,5% призводить до збільшення міцності з 24,2 до 27,5 МПа, тобто майже на 13%.

Спільний вплив на шлакопортландцемент механоактивації, Супер-ПК і базальтової фібри призводить до підвищення міцності в 28-ми добовому віці бетону в порівнянні з контролем (бетон на немеханоактивованому портландцементі, Супер-ПК і базальтова фібра відсутні) з 11,3 до 29,5 МПа, тобто більш ніж в 2,5 рази.

Важливою властивістю бетонів є їх спротив стиранню.

ЕС-моделі, що відображають вплив рецептурних факторів складу керамзитобетону у віці 28-ми днів, виготовленого за роздільною (індекс «s») та традиційною (індекс «t») технологіями, на рівень його стирання, мають вигляд:

$$G_{1,s} (\text{г/см}^2) = 0.243 - 0.033x_1 + 0.002x_1^2 + 0.008x_1x_3 - 0.010x_2 - 0.003x_2^2 - 0.107x_3 + 0.032x_3^2 \quad (7)$$

$$G_{1,t} (\text{г/см}^2) = 0.274 - 0.033x_1 + 0.008x_1x_3 - 0.01x_2 - 0.006x_2^2 - 0.108x_3 + 0.034x_3^2 \quad (8)$$

Максимальною стиранністю $G_{1,t, \min} = 0,46$ (г/см^2), $G_{1, \min} = 0,43$ (г/см^2) згідно з даними ЕС-моделей (7) та (8) характеризуються склади в точці з координатами $x_1 = x_2 = x_3 = -1$, тобто при мінімальній кількості суперпластифікатора, портландцементу і без фібри. Мінімальною стиранністю відповідно $G_{1,t, \max} = 0,16$ г/см^2 і $G_{1,s, \max} = 0,13$ г/см^2 характеризуються склади у точці з координатами $x_1 = x_2 = x_3 = 1$, тобто при максимальній кількості суперпластифікатора Супер-ПК, шлакопортландцементу та базальтової фібри.

На рис. 5 показані побудовані за ЕС-моделями (7) і (8) суміщені діаграми, що відображають вплив кількості базальтової фібри на стирання керамзитобетону в діапазоні витрати в'язучого 350-550 кг/м^3 .

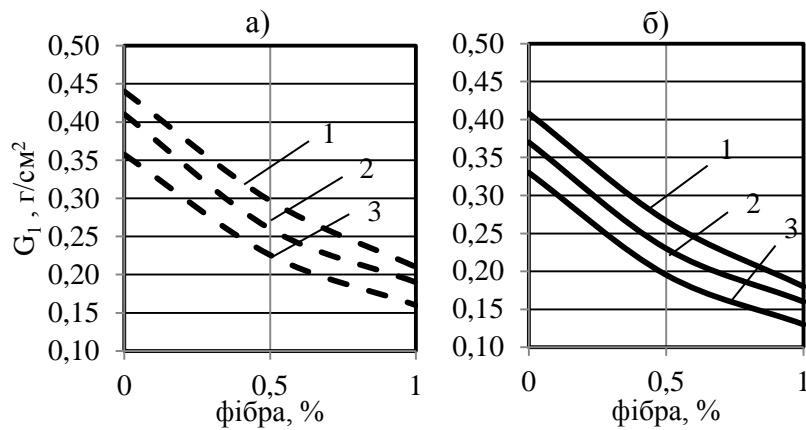


Рис. 5. Вплив вмісту базальтової фібри у в'язучому на стирання керамзитобетону:
 1, 2, 3 – витрата в'язучого на 1 м³ бетону 350, 450 та 550 кг/м³ відповідно.
 а – контроль (механоактивація в'язучого відсутня); б – бетон на механоактивованому в'язучому

Аналіз експериментальних даних свідчить про те, що збільшення кількості базальтової фібри, що вводиться в бетон, призводить до зниження величини стирання з 0,44 г/см² (фібра відсутня) до 0,16 г/см² (кількість фібри 1%), тобто більш ніж у 2,5 рази. Зниження стирання, на наш погляд, пояснюється армуючими властивостями волокон, що утримують окремі блоки тендітної цементно-піщаної матриці при механічних впливах на них. Аналогічний вплив базальтової фібри на стирання бетону зазначено у роботах [12-14].

Слід зазначити, що вплив дозування фібри на рівень G_1 має нелінійний характер: при введенні 0,5% волокна від маси в'язучого стирання знижується на 30..36%, тоді як введення її в кількості від 0,5 до 1%, наводить зниження G_1 з 0,25 г/см² до 0,19 г/см², тобто лише на 24%.

Встановлено, що в рамках проведеного експерименту ефективність застосування фібри в незначній мірі залежить від кількості добавки – пластифікатора (рис. 6).

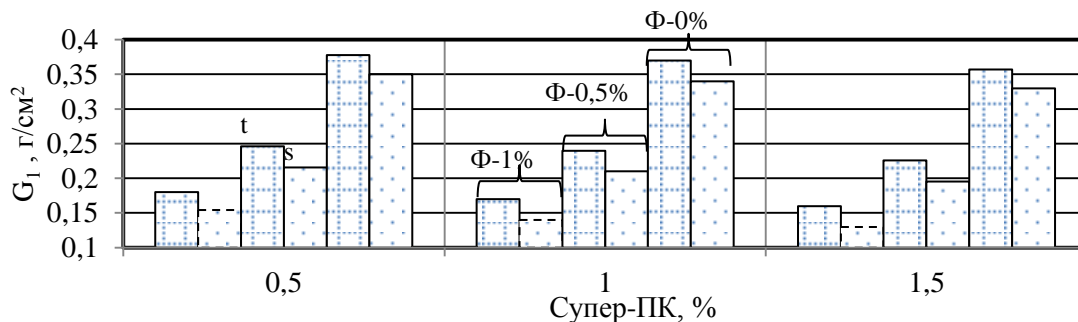


Рис. 6. Вплив кількості суперпластифікатора Супер-ПК на стирання керамзитобетону:
 t – традиційна технологія; s – роздільна технологія

Як видно з діаграми (рис. 6), при підвищенні кількості добавки Супер-ПК з 0.5 до 1.5% від маси в'язучого, стирання бетону знижується на 0.02-0.03 г/см², що пояснюється загальним зміцненням структури за рахунок зниження В/Ц суміші рівної рухливості. При цьому в міру збільшення кількості базальтової фібри ефективність підвищення дозування добавки зростає.

Керамзитобетон на механоактивованому в'язучому характеризується підвищеною зносостійкістю (порівняно з традиційною технологією приготування бетонної суміші), що можна пояснити зниженням його водопотреби. В цілому, за рахунок підвищення кількості добавки суперпластифікатора полікарбоксилатного типу в механоактивований шлакопортландцемент, витрати в'язучого та введення базальтової фібри, зносостійкість керамзитобетону може бути підвищена більш ніж у 3 рази.

Морозостійкість є дуже важливим показником якості легких бетонів. ЕС-моделі, що відображають вплив факторів складу, що варіюються, на морозостійкість керамзитобетону (відповідно активованого і контрольного) наведені нижче:

$$F_{t(\text{цикли})} = 291,1 + 55,0x_1 - 13,9x_1^2 + 25,0x_2 - 13,8x_2^2 - 13,8x_3 \quad (9)$$

$$F_{s(\text{цикли})} = 336,7 + 40,0x_1 - 33,3x_1^2 - 12,5x_1x_2 + 15,0x_2 - 8,3x_2^2 + 25,0x_3 - 8,3x_3^2 \quad (10)$$

Необхідно відзначити, що оскільки методика випробувань і відповідно нормативи передбачають тільки дискретні марки по морозостійкості матеріалу з кроком у 25 циклів, точність оцінки впливу факторів складу що варіюються на величину F значною мірою обумовлена такою дискретністю. Іншими словами, неможлива плавна зміна оціненої в експерименті морозостійкості бетону при варіюванні його складу.

Це необхідно враховувати при аналізі як самого показника F , так і ЕС-моделей, побудованих за результатами визначення даного показника для окремих бетонів, виготовлених у процесі виконання експерименту. Графічна інтерпретація моделей (9) і (10), що описують вплив рецептурних факторів на морозостійкість керамзитобетону виготовленого за роздільною та традиційною технологіями, наведені на рис. 7.

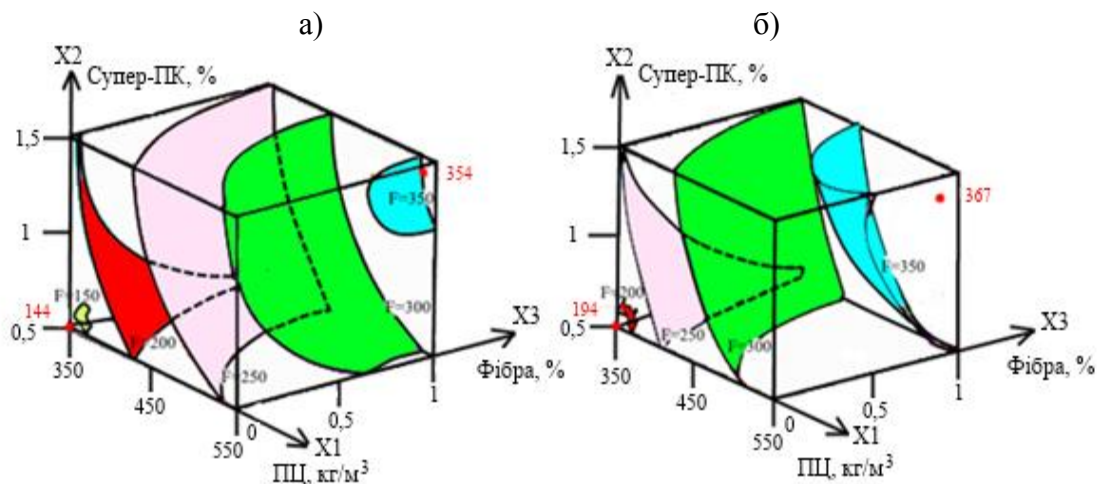


Рис. 7. Вплив рецептурних факторів складу на морозостійкість керамзитобетону, виготовленого за роздільною та традиційною технологіями:

а – контроль (механоактивація в'язучого відсутня); б – бетон на механоактивованому в'язучому

Аналіз графічних залежностей свідчить про те, що фактори складу, що варіюються, надають подібний вплив на морозостійкість бетонів виготовлених як за роздільною, так і традиційною технологіями.

Слід зазначити, що найбільше впливає на морозостійкість керамзитобетону витрата в'язучого. Так, збільшення вмісту в'язучого з 350 до 450 $\text{кг}/\text{м}^3$ призводить до підвищення морозостійкості керамзитобетону на 75 циклів (незалежно від умов виготовлення бетонної суміші). Подальше збільшення витрати в'язучого до 550 $\text{кг}/\text{м}^3$ підвищує рівень F приблизно на 25-50 циклів. У меншій мірі на морозостійкість бетону впливає вміст базальтової фібри. Введення в керамзитобетон 1% базальтової фібри викликає збільшення морозостійкості в середньому на 50-75 циклів (порівняно з бетоном без добавок).

Введення суперпластифікатора Супер-ПК викликає нелінійну зміну морозостійкості досліджених керамзитобетонів. При збільшенні кількості добавки з 0,5 до 1% рівень F підвищується приблизно на 50 циклів незалежно від витрати в'язучого. Подальше збільшення дозування Супер-ПК до 1,5% призводить до збільшення морозостійкості на 25 циклів. Такий

вплив суперпластифікатора можна пояснити тим, що за умови збереження рівної рухливості суміші добавка знижує кількість води замішування і відповідно пористість. Зниження загальної пористості, з одного боку, викликає підвищення міцності композиту, що сприяє підвищенню морозостійкості, з іншого боку при значному збільшенні концентрації суперпластифікатора значною мірою знижується і кількість закритих пір, що виконують роль компенсаторів об'єму при замерзанні води. Хоча в цілому проведені дослідження говорять про незначний вплив кількості добавки Супер-ПК на морозостійкість.

За рахунок введення суперпластифікатора Супер-ПК в ШПЦ, механоактивації в'язучого, використання базальтової фібри, морозостійкість керамзитобетону може бути підвищена більш ніж в 2 рази.

Представляє інтерес з'ясувати вплив рецептурних факторів на ударну міцність керамзитобетону. Експериментально встановлені в процесі випробувань на лабораторному копрі значення ударостійкості (Дж/см²) для п'ятнадцяти досліджених складів керамзитобетонів. Вплив факторів складу, що варіюються, на ударостійкість керамзитобетонів описують наведені нижче відповідні ЕС-моделі:

$$a_t = 51,6 + 4,9x_1 - 1,1x_1^2 - 0,2x_1x_2 + 2,5x_2 - 0,6x_2^2 + 13,9x_3 - 3x_3^2 \quad (11)$$

$$a_s = 58,6 + 5,1x_1 - 1,2x_1^2 - 0,3x_1x_2 + 2,4x_2 - 1,1x_2^2 + 14,1x_3 - 3,1x_3^2 \quad (12)$$

Аналіз моделей (11) і (12) показав, що найбільший вплив на ударостійкість керамзитобетону надає концентрація базальтової фібри. Так, введення фібри в кількості 0,5% від маси в'язучого призводить до підвищення ударостійкості бетонів на 17-20 Дж/см² (рис. 8), залежно від витрати в'язучого та вмісту Супер-ПК. Подальше збільшення вмісту базальтового волокна до 1% підвищує показник ударостійкості на 10-12 Дж/см².

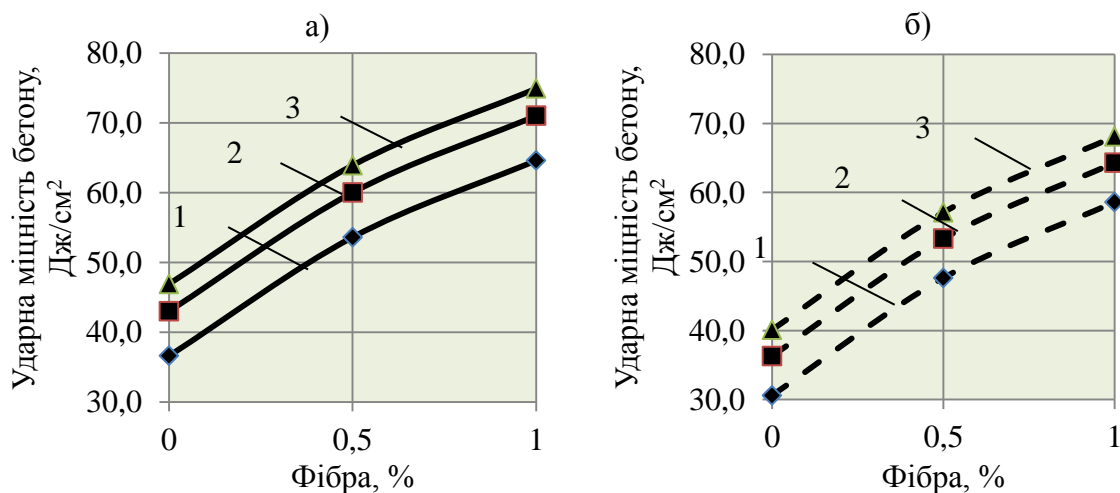


Рис. 8. Вплив вмісту базальтової фібри у в'язучому на ударостійкість керамзитобетону:

1, 2, 3 – витрата в'язучого на 1 м³ бетону 350, 450 та 550 кг/м³ відповідно.

а – контроль (механоактивація в'язучого відсутня); б – бетон на механоактивованому в'язучому

Істотному впливу на ударну міцність керамзитобетону сприяє підвищення витрати в'язучого. Зі збільшенням вмісту в'язучого від 350 до 550 кг/м³ ударна міцність бетону підвищується з 58,6 до 68,1 Дж/см² (при максимальному вмісті базальтового волокна), тобто майже на 15%.

Графічна інтерпретація моделей (11, 12), що описують вплив рецептурних факторів на ударну міцність бетонів виготовлених за роздільною та традиційною технологіями представлена на рис. 9.

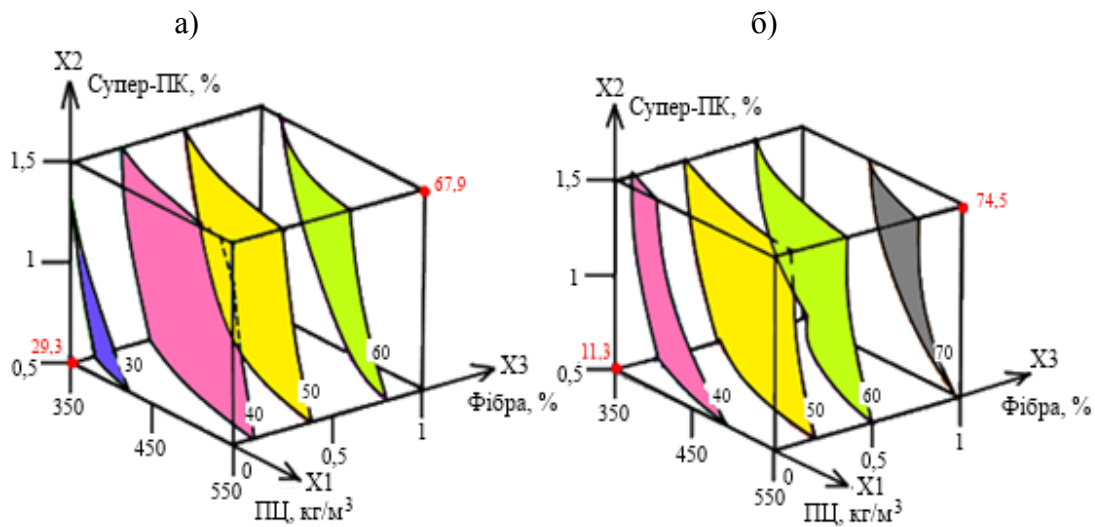


Рис. 9. Вплив рецептурних факторів на ударну міцність бетонів (Дж/см²), виготовлених за роздільною та традиційною технологіями:

а – контроль (механоактивація в'язучого відсутня); б – бетон на механоактивованому в'язучому

Незначний вплив на приріст ударної міцності надає кількість Супер-ПК. Так, при введенні суперпластифікатора від 0,5 до 1,5% (баз фібра – 1%, витрата в'язучого 550 кг/м³) значення показника ударної міцності збільшується з 63,5 до 68,1 Дж/см², тобто на 8%.

Механоактивація в'язучого збільшує ударну міцність бетону у всьому діапазоні вмісту базальтової фібри в шлакопортландцементі. Застосування механоактивації в'язучого призводить до підвищення ударної міцності бетону в середньому на 10-14%.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

1. Введення базальтової фібри спільно з механоактивацією в'язучого дозволяє підвищити показник зносостійкості бетону більше ніж у 3 рази.

2. Керамзитобетон на механоактивованому шлакопортландцементі з додаванням базальтової фібри та суперпластифікатора Супер-ПК характеризується морозостійкістю не нижче F200. Наявність базальтової фібри у суміші підвищує ударну міцність бетону з 47 до 75 Дж/см².

3. Встановлено, що механоактивація в'язучого призводить до підвищення міцності бетону в 3-х денному віці з 11,4 до 16,2 МПа, тобто більш ніж на 40% порівняно з контролем. Введення базальтової фібри в кількості 1% від маси механоактивованого в'язучого забезпечує подальше зростання міцності бетону на 10-15%.

У подальших дослідженнях передбачено вдосконалення технології приготування литих бетонних сумішей з покращеними фізико-механічними характеристиками.

Література

1. Дервянко В.Н. Саламаха Л.В. Дисперсно-армированные растворы для устройства стяжек полов. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2009. С. 14-19.
2. Барабаш И.В. Моделирование механизмов структурообразования механоактивированных грубодисперсных систем. *Материалы к 39-му международному симпозиуму по моделированию и оптимизации композитов МОК-39*. Одесса. 2000. С. 75.
3. Пухаренко Ю.В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: автореф. дисс. док. техн. наук. Санкт-Петербург, 2004. 46 с.
4. Ксеншкевич Л.Н., Барабаш И.В., Даниленко А.В. Влияние базальтовой фибры на прочность цементного камня. *Збірник наукових праць «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди»*. Рівне. 2015. С. 163-167.
5. Толмачев С.Н. Сравнительная оценка истираемости монолитного бетона и его компонентов. *Строительные материалы*. 2012. С. 11-13.

6. Dorf V. A. Влияние содержания и характеристик фибры на коэффициент истираемости сталефибробетона с цементно-песчаной матрицей. *Технологии бетонов*. 2014. С. 27-29.
7. Gołaszewski J. Wpływ zawartości popiołu lotnego wapiennego oraz zbrojenia rozproszonego na wybrane charakterystyki fibrobetonów samozagęszczalnych civil and environmental engineering. *Budownictwo i inżynieria środowiska*, 2011. P. 281-287.
8. Бужевич Г.А. Легкие бетоны на пористых заполнителях. Стройиздат, Москва, 1976. 236 с.
9. Барабаш И.В., Итомлина-Напорчук А.В., Щербина О.С., Бурлаков Е.С., Колесник И.Г. Влияние волокнистого наполнителя на прочность цементного камня. *Вісник ОДАБА*. 2013. Вип. №50. С. 21-25.
10. Армированные волокнами вяжущие композиционные материалы: вклад полиамидных волокон. URL: [http:// www.trotuar.ru/forms/dobavki/fibra2.shtml](http://www.trotuar.ru/forms/dobavki/fibra2.shtml).
11. Lypcz-Buendna A.M., Romero-Sánchez M.D., Climent V., Guillem C. Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*. 2013. P. 29–35.
12. Ghanbari A., Karihaloo B.L. Prediction of the plastic viscosity of self-compacting steel fibre reinforced concrete. *Cement Concrete Research*. 2009. P. 1209–1216.
13. Choi Yun Wang, Kim Yong Jic, Shin Hwa Cheol, Moon Han Young An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high – strength lightweight self – compacting concrete. *Cement And Concrete Research*. 2006. P. 1595 – 1602.
14. Щербина О.С., Барабаш И.В., Кровяков С.А., Барабаш Т.И. Снижение энергоёмкости производства самоуплотняющихся легкобетонных. *Енергоефективні технології в будівництві та міському господарстві: м-ли V міжнародної науково-практичної конференції*. Одеса. ОДАБА. 2014. С. 186-190.
15. Щербина О.С. Прочность цементного камня на механоактивированном шлакоосержащем вяжущем. *Первый независимый научный вестник*. 2016. Вып. №12-13. С. 44-47.

References

- [1] V.N. Derevianko, L.V. Salamakha, "Dispersno-armirovannye rastvory dlya ustrojstva stvazhek polov", *Stroitel'stvo, materi-alovedenie, mashinostroenie*, 2009, pp. 14-19.
- [2] I.V. Barabash, "Modelirovanie mekhanizmov strukturoobrazovaniya mekhanoaktivirovannyh grubodispersnyh system", *Materialy k 39-mu mezhdunarodnomu simpoziumu po modelirovaniyu i optimizacii kompozitov MOK-39*, Odessa, 2000, pp. 75.
- [3] Y.V. Puharenko, "Nauchnye i prakticheskie osnovy formirovaniya struktury i svojstv fibrobetonov", avtoref. diss. dok. tekhn. nauk. Sankt-Peterburg, 2004.
- [4] L.N. Ksenschkevich, I.V. Barabash, A.V. Danilenko, "Vliyanie bazal'tovoj fibry na prochnost' cementnogo kamnya", *Resursoekonomni materialy, konstrukcii, budivli ta sporudi*, pp. 163-167, 2015.
- [5] S.N. Tolmachev, "Sravnitel'naya ocenka istiraemosti monolitnogo betona i ego komponentov", *Stroitel'nye materialy*, 2012, pp. 11-13.
- [6] V.A. Dorf, "Vliyanie soderzhaniya i harakteristik fibry na koefficient istirae-mosti stale-fibrobetona s cementno-peschanoj matricej", *Tekhnologii betonov*, 2014, pp. 27-29.
- [7] J. Gołaszewski, "Wpływ zawartości popiołu lotnego wapiennego oraz zbrojenia rozproszonego na wybrane charakterystyki fibrobetonów samozagęszczalnych civil and environmental engineering", *Budownictwo i inżynieria środowiska*, 2011, pp. 281-287.
- [8] G.A. Buzhevich, *Legkie betony na poristyh zapolnitelyah*. Stroizdat, Moskva, 1976.
- [9] I.V. Barabash, A.V. Itomlina-Naporchuk, O.S. Shcherbina, E.S. Burlakov, I.G. Kolesnik, "Vliyanie voloknistogo napolnitelya na prochnost' cementnogo kamnya", *Visnik ODABA*, vol. 50, pp. 21-25, 2013.
- [10] Armirovannye voloknami vyzhushchie kompozicionnye materialy: vklad poliamidnyh volokon. [Online]. Available: [http:// www.trotuar.ru/forms/dobavki/fibra2.shtml](http://www.trotuar.ru/forms/dobavki/fibra2.shtml).
- [11] A.M. Lypcz-Buendna, M.D. Romero-Sánchez, V. Climent, C. Guillem, "Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete", *Cement and Concrete Research*,

- 2013, pp. 29-35.
- [12] A. Ghanbari, B.L. Karihaloo, "Prediction of the plastic viscosity of self-compacting steel fibre reinforced concrete", *Cement Concrete Research*, 2009, pp. 1209-1216.
- [13] Choi Yun Wang, Kim Yong Jic, Shin Hwa Cheol, Moon Han Young, "An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high – strength lightweight self – compacting concrete", *Cement And Concrete Research*, 2006, pp.1595-1602.
- [14] O.S. Shcherbina, I.V. Barabash, S.A. Krovyakov, T.I. Barabash, "Snizhenie energoemkosti proiz-vodstva samouplotnyayushchihsya legkobetonnyh. Energoefektivni tekhnologii v budivnictvi ta mis'komu gospodarstvi", *M-li V mizhnarodnoi naukovo-praktichnoi konferencii*. Odesa, 2014, pp. 186-190.
- [15] O.S. Shcherbina, "Prochnost' cementnogo kamnya na mekhanoaktivirovannom shlakosoderzhashchem vyazhushchem", *Pervyj nezavisimyj nauchnyj vestnik*, vol. 12-13, pp. 44-47, 2016.

THE INFLUENCE OF BASALT FIBER ON THE PROPERTIES OF CLAYDATE-CONCRETE

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

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

²**Shcherbyna O.S.**, PhD.,
olegito4ka@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8180-4665

²*"Bautech-Ukraine" LLC*
4/1, Himichna str., Odessa, 65000, Ukraine

Abstract. The paper examines the properties of dispersed-reinforced cast expanded clay concrete on mechanically activated slag Portland cement with the addition of Super-PC polycarboxylate superplasticizer. Experimental studies have established the possibility of obtaining lightweight concrete based on high-mobility lightweight concrete mixtures with a diameter of a cone of at least 50 cm.

It has been experimentally confirmed that the hydrophobization of expanded clay gravel helps to increase the spreading of the cone of the concrete mixture, and also increases the viability of the concrete mixture. The expediency of mechanical activation of slag Portland cement in the presence of Super-PC to obtain light concrete with increased characteristics in terms of frost resistance, abrasion and impact strength is shown.

The results of research are presented, which indicate that the introduction of basalt fiber into slag Portland cement together with the mechanical activation of the binder allows to reduce the abrasion of concrete from 0.44 to 0.13 g/cm², as well as to increase the impact strength of concrete by almost 2 times (compared to with control). The proposed complex of recipe-technological influences allows to ensure frost resistance of concrete not less than 350 cycles of alternating freezing and thawing.

It was established that the mechanical activation of the binder causes an increase in the strength of concrete at the age of 3 days from 11.3 to 16.2 MPa, that is, by more than 40% compared to the control. The introduction of basalt fiber in the amount of 1% of the mass of the binder ensures an increase in the strength of concrete by 10-15%. The joint effect on slag Portland cement of mechanical activation, additives of poly-carboxylate Super-PC and basalt fiber causes an increase in the strength of concrete at the age of 28 days (compared to the control) from 11.3 to 29.5 MPa, i.e. more than 2.5 times.

In general, the combined use of the listed recipe-technological factors ensures an increase in the main physical and mechanical characteristics of lightweight concrete.

Keywords: expanded clay concrete, mechanical activation, basalt fiber, polycarboxylate superplasticizer, abrasion, frost resistance, impact strength.

Стаття надійшла до редакції 14.08.2022

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE USE OF EXPANSION AGENTS IN REPAIR SOLUTIONS OF DRY BUILDING MIXTURES FOR IMPROVING HARDENING CONDITIONS¹**Hedulian S.I.**, PhD,

shedulian@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0001-5732-6042

¹**Gara O.A.**, PhD, Professor,

garaogasa@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2413-1860

¹**Savchenko S.V.**, PhD, Associate Professor,

koval_sv@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4973-0552

¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*

4, Didrichson street, Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. The article examines the possibility of increasing the compatibility of repair solutions based on dry mixes with damaged concrete and reinforced concrete structures by improving the curing conditions of such materials through comparative analysis of adhesive strength and linear shrinkage of cement samples using different types of superabsorbents, namely SAP Newsorb based on sodium polyacrylates from the Japanese manufacturer Newstone, Chinese MNC-SAP based on potassium polyacrylates from MUHU Construction Materials and AquaGel based on cross-linked copolymer of acrylamide and potassium acrylate from the Australian Baroid.

The data obtained during experimental studies show that the use of investigated SAP superabsorbents additives due to the improvement of hydration conditions in the cement matrix of the repair material can partially compensate the growth of shrinkage deformations, which, in turn, slightly improves the indicators of the adhesive strength of the bond with the surface of the damaged structure.

A positive effect of the use of the specified polymer admixtures on the investigated cement solutions was established. Compared to the base sample, on average, for each of the studied days of hardening, the shrinkage rate of all samples containing SAP was reduced by 35%, which justifies their use in order to facilitate the creation and further high-quality functioning of the repair system. The addition of the studied SAPs allows to improve the adhesion index by 1.5-2.3 times compared to the basic one, which should ensure the maximum ability of the repaired system to perceive the workload.

The optimal contents of SAP additives in the composition of the studied cement mortars to reduce shrinkage and increase the adhesive strength were determined. The compositions of non-structural repair cement mortars of class RM3 and R1-R2 in terms of adhesive strength and classes RM1-RM2 in terms of shrinkage deformation in accordance with Ukrainian and European standards were obtained.

Keywords: repair solutions, dry mixes, expansion agents, superabsorbent, adhesion, linear shrinkage.

Introduction. Nowadays, carrying out repair and restoration works of damaged concrete and reinforced concrete structures is of particular importance. Structures that have undergone partial destruction require local restoration works using modern repair materials to restore their operational characteristics without decommissioning them and in a short period of time.

Repair solutions based on dry construction mixtures are powder compositions based on mineral or polymer binders with the use of finely dispersed fillers, fine fractional aggregates and a complex of chemical additives, intended for the restoration and protection of structurally damaged horizontal, vertical and ceiling elements of structures when performing all types of repair and restoration works at civil, industrial and special construction sites [1-3].

In recent years, the regulatory framework for such materials has expanded in the direction of increasing the set of requirements for solutions and accounting for the parameters of joint work when creating compatible systems (in technological and physicochemical terms) [4-8], while in practice it becomes necessary to ensure additional properties. In addition to the appropriate

indicators of strength, rheological properties and reduction of setting and hardening time to reduce the period of repair work and to put the facility into operation as soon as possible, one of the most important characteristics of such materials is the increase of adhesion to the base (substrate) being repaired to create conditions for compatible work with a damaged structure and reduction of shrinkage deformations to prevent cracking of the material and the occurrence of defects in the contact zone between solution and substrate, which can be achieved by improving the hardening conditions when using polymer additives for internal care of the hardening material [9-11].

Analysis of research and publications. Along with the classic methods of reducing shrinkage deformations [12-15], expanding polymeric agents (superabsorbents) of various chemical nature are increasingly used recently [9, 16].

Superabsorbent (Super Absorbent Polymer, SAP) is a polymer humectant that absorbs and retains certain amounts of water, which is subsequently released into the cement matrix of the repair solution and provides the highest quality hydration process, thereby reducing the appearance of internal stresses and reducing the possibility of autogenous shrinkage in the solution, especially at very low W/C rates. Based on the concept of the repair system [4, 5, 8], which includes the idea of the joint operation of the repair material through the contact layer with the substrate being repaired, the increase in shrinkage deformations in the thickness of such material will be negatively reflected on the adhesion indicators [17-20]. In the hydrated form, the superabsorbent granule is a water-saturated gel, which has the property of easy return of absorbed water. Absorbent molecules contain a set of polymer chains parallel to each other, which are regularly connected by crosslinking agents, forming a network [16]. When the water contained in the solution comes into contact with the SAP, it is drawn into the polymer molecule by osmosis [21]. Thus, stored water quickly migrates inside the polymer mesh. In the process of hardening of the repair material, water encapsulated in SAP moves back into the solution, ensuring a normal hydration process and improving the conditions of hardening of the repair material [9, 16, 21].

For such materials and systems for the repair and restoration of damaged concrete and reinforced concrete structures the European standard [22] singles out the concepts of adhesive strength and general shrinkage as indicators that are of particular importance for successful repair work. The standards [4, 23] stipulate that the amount of deformation of repair composites that harden, according to the corresponding classes, should not exceed 1.2-2 mm/m, and adhesion to the concrete substrate should be ensured at the level of 0.8-2 MPa.

Problem statement. The purpose of this work is to investigate the possibility of increasing the compatibility of repair solutions based on dry building mixtures with damaged concrete and reinforced concrete structures by the improvement of the hardening conditions of such materials through a comparative analysis of indicators of adhesive strength and linear shrinkage of cement samples using different types of superabsorbents, namely SAP Newsorb based on sodium polyacrylates from the Japanese manufacturer Newstone, Chinese MNC-SAP based on potassium polyacrylates from MUHU Construction Materials and AquaGel based on a cross-linked copolymer of acrylamide and potassium acrylate from Australian Baroid.

Research materials and methodology. European CEM I 42.5 R was used as a binder for the preparation of samples, and quartz sand with a fraction of 0.125-0.63 was used as a fine aggregate. To control the rheological properties of the solutions, a powder superplasticizer based on polycarboxylate CABR CCS from the manufacturer Luoyang Tongrun was used. The selection of the amount of water to maintain the necessary working consistency, which is the same for all investigated solutions, was carried out according to the method specified in [4]. For the completeness of the comparative analysis, a solution without superabsorbents was used as the base composition. The compositions of the studied samples are shown in Table 1.

For all investigated compositions of cement samples, adhesive strength indicators were determined using the DYNA Z16 adhesiometer in accordance with [22] and linear shrinkage using the Controls 62-L0009/F mold and the Controls Nirois 62-L0035/A comparator in accordance with [24].

For the study of adhesion parameters, washer samples Ø50 mm and a material thickness of 10 mm were produced, as well as reference concrete slabs in accordance with [25] (PC II/A-S-400,

gravelly sand 0-8 mm, W/C rate 0.45, without using grease for molds, water absorption on the surface of 3.2 cm³ after 4 hours). In order to obtain the most reliable data on the quality of adhesion of repair composites to concrete slabs, the results of AF-S and CF-S types of adhesive bond loss only were taken into account. In accordance with [26], the polymer primer Acryl-Putz GP 41 was used as a contact layer. To determine the parameters of linear shrinkage, samples-beams of size 40×40×160 mm with embedded end elements were used.

Table 1 – Compositions of the studied samples

No.	Cement, g/kg	Sand, g/kg	CABR CCS, g/kg	SAP Newsorb, g/kg	MNC-SAP, g/kg	AquaGel, g/kg	Water, ml
1	435.00	563.11	1.89	–	–	–	72.40
2		560.11		3.00	–	–	81.28
3		558.11		5.00	–	–	94.22
4		561.11		–	2.00	–	79.36
5		559.11		–	4.00	–	99.74
6		561.61		–	–	1.50	88.17
7		560.11		–	–	3.00	102.97

Research results. During the experimental studies, data were obtained on the indicators of adhesive strength and linear shrinkage of cement samples of repair mortars based on dry building mixes for repair and restoration of concrete and reinforced concrete structures and structures using various types of superabsorbents.

As can be seen from Table 1, it should be noted that with the same working consistency of all solutions, the water consumption in all compositions containing SAP expanding polymer agents is higher than the basic composition by an average of 22%, which is explained by the high absorption capacity of free SAP granules due to the ionic nature, internal linked structure and the formation of secondary chemical bonds [9-11]. The largest amount of water while maintaining the working consistency indicator was required for composition 7 with a content of 3 g/kg of AquaGel superabsorbent, which can be explained by the fact that, unlike most polymer products that absorb water, the superabsorbent based on the cross-linked copolymer of acrylamide and potassium acrylate has a lower amount of crosslinking agent than the other two SAPs in the study. A more cross-linked polymer has a denser network, which reduces its capacity and reduces the property of easy return of absorbed water, but increases the stability of the polymer over time [10].

Table 2 shows the obtained indicators of shrinkage deformations of the studied samples.

Table 2 – Shrinkage deformations of the studied samples

No.	Sample marking	Shrinkage rate per day of hardening, mm/m		
		1	5	10
1	Basic without SAP	0.202	0.823	1.318
2	SAP Newsorb, 3 g/kg	0.126	0.597	1.088
3	SAP Newsorb, 5 g/kg	0.094	0.449	0.756
4	MNC-SAP, 2 g/kg	0.128	0.622	1.240
5	MNC-SAP, 4 g/kg	0.107	0.508	1.103
6	AquaGel, 1.5 g/kg	0.114	0.559	0.998
7	AquaGel, 3.5 g/kg	0.079	0.466	0.779

Sample 7 with a content of 3.5 g/kg of AquaGel superabsorbent shows the lowest shrinkage rates (Fig. 1), taking into account the dosage – 41% less compared to the rate of the base sample on the 10th day of curing.

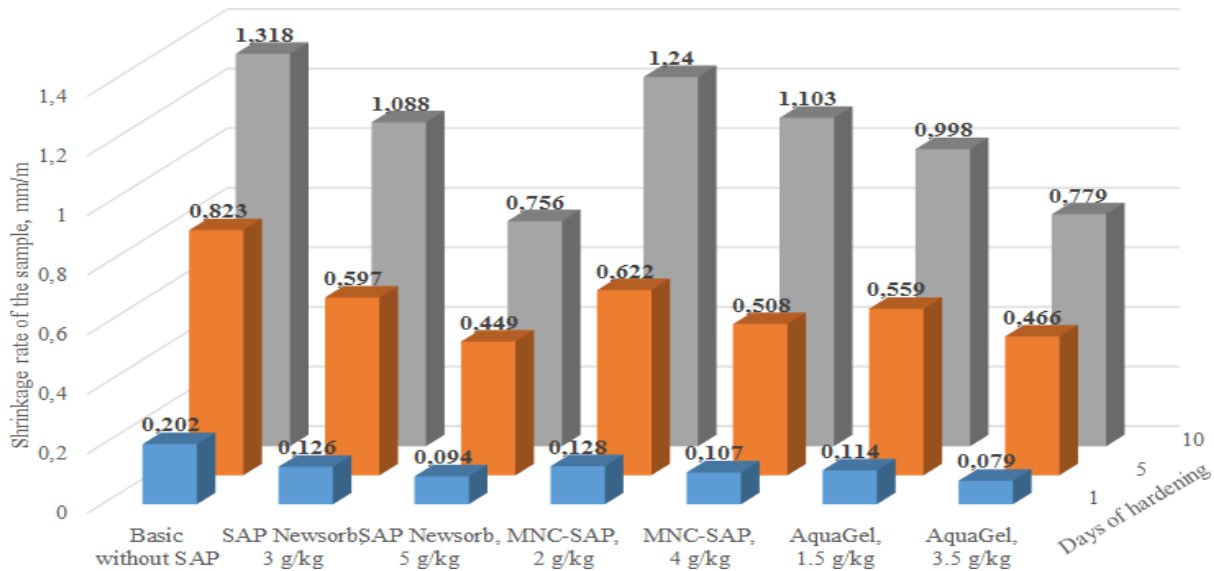


Fig. 1. Shrinkage rates on the 1st, 5th, and 10th days of samples' hardening

It should be noted that due to the dense polymer network and, as a result, high stability in the "feeding" of the cement matrix of the hardening sample, SAP Newsorb superabsorbent based on sodium polyacrylates in the amount of 5 g/kg reduces the rates of shrinkage deformations, showing lower indicators especially in the later curing days – on the 5th and 10th days.

Taking into account the average value of shrinkage deformations of PC binder of 3-5 mm/m and indicators of the base composition, it is necessary to note the overall positive effect of the use of expanding polymer agents to reduce shrinkage deformations of repair materials based on PC binders. On average, for each of the studied hardening days, the shrinkage rate of all samples containing SAP was reduced by 35%, which justifies their use in order to facilitate the creation and further high-quality functioning of the repair system. All tested samples of cement mortar containing SAP expanding agents, except for sample 4, according to the index of shrinkage deformations, correspond to the repair material class RM1-RM2 according to [23].

According to the standard [22], the concept of adhesion strength is defined as the bond strength of the applied repair product or system with the concrete substrate, the strength of contact at the boundary of the distribution of two materials. Based on the micro rheological theory of adhesion [27], the quality of this boundary directly depends on the deformation background of the material that hardens in the zone of formation of the contact zone of the repair system [28-33].

When studying the adhesive strength index, samples of the tested cement mortars were applied to the primed surface of reference concrete slabs, kept for a day in a normal hardening chamber and for another day in air-dry conditions. The obtained results of measurements of the adhesion of repair solutions to the concrete substrate through the contact layer are shown in Table 3.

Table 3 – Adhesion indicators of the studied samples to the concrete substrate

No.	Sample marking	Adhesion index f_A , MPa					
		For each sample					\bar{f}_A
1	Basic without SAP	0.66	0.57	0.64	0.59	0.62	0.62
2	SAP Newsorb, 3 g/kg	1.21	1.18	1.08	1.27	1.22	1.19
3	SAP Newsorb, 5 g/kg	1.44	1.49	1.33	1.38	1.54	1.44
4	MNC-SAP, 2 g/kg	0.88	0.92	0.87	0.85	0.99	0.90
5	MNC-SAP, 4 g/kg	1.06	1.19	1.21	1.11	1.19	1.15
6	AquaGel, 1.5 g/kg	1.08	0.98	1.17	1.06	1.01	1.06
7	AquaGel, 3.5 g/kg	1.32	1.49	1.36	1.44	1.33	1.39

The highest adhesion values (Fig. 2) of 1.44 MPa and 1.39 MPa were observed in samples with 5 g/kg of SAP Newsorb and 3.5 g/kg of AquaGel, respectively. Taking into account the dosage, the superabsorbent based on sodium polyacrylates increases the adhesive properties of the material by 24% compared to the base sample.

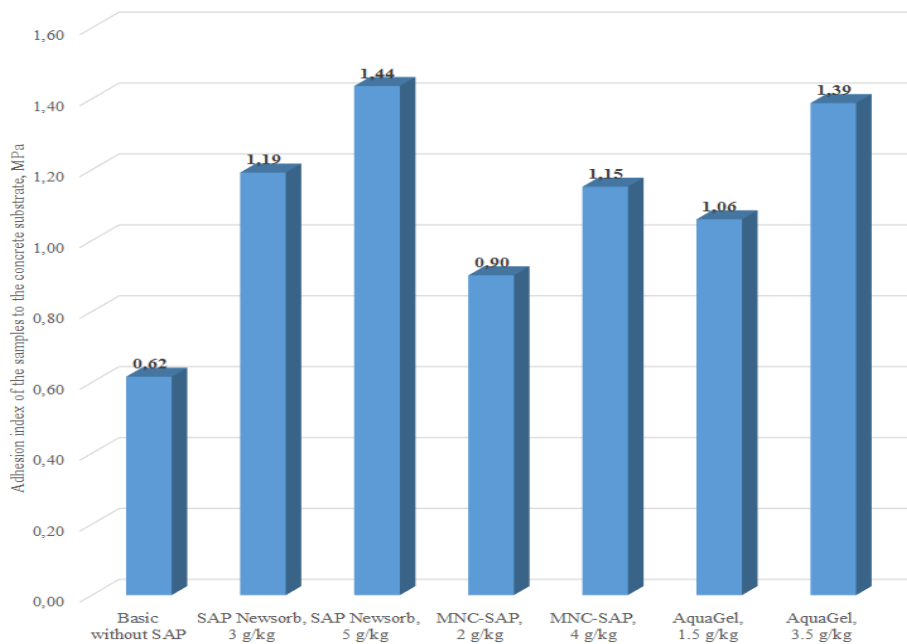


Fig. 2. Indicators of adhesion of the samples to the concrete substrate

In general, the introduction of the studied SAPs into the composition of solutions for carrying out repair work based on PC binder allows to improve the adhesion index by 1.5-2.3 times, which should ensure the maximum ability of the repaired system to absorb the workload. It should also be noted the rather high level of correlation (Fig. 3) of the obtained indicators of adhesive strength and shrinkage deformations of the samples throughout the entire period of their measurement.

All tested cement mortar samples containing SAP expanding agents correspond to the repair material class RM3 according to [23] and classes R1-R2 according to [4] according to the adhesion index. The base sample without SAP content according to [4] and [23] cannot be used as a repair material.

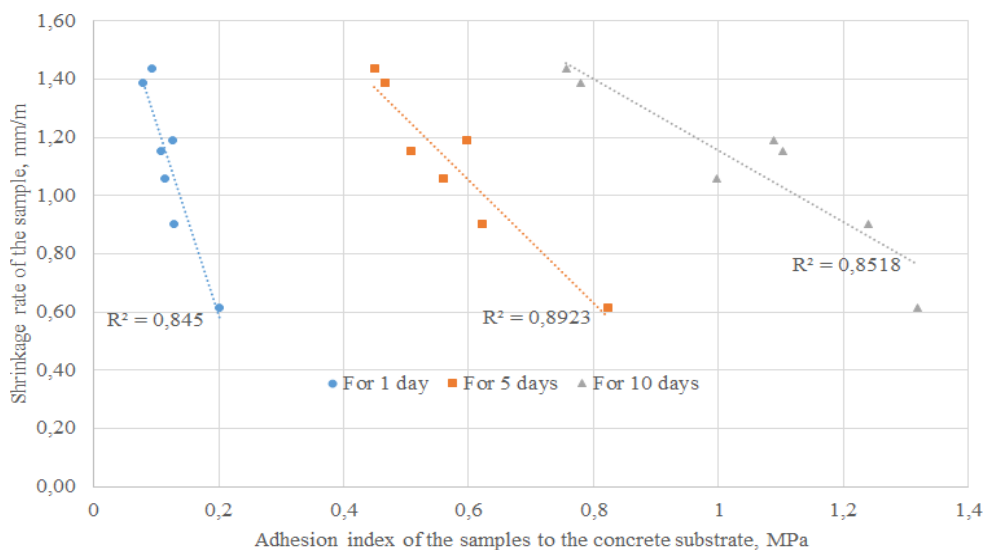


Fig. 3. Dependence of indicators of adhesion of samples to the concrete substrate on shrinkage deformations

Conclusions. The use of investigated SAP superabsorbent additives due to the improvement of hydration conditions in the cement matrix of the repair material can partially compensate for the growth of shrinkage deformations, which, in turn, slightly improves the indicators of the adhesive strength of the bond with the surface of the damaged structure.

With the same working consistency of all tested solutions, the water consumption of all compositions containing SAP expanding polymer agents is higher than the base composition by an average of 22%. The largest amount of water while maintaining the working consistency index was needed for the cement sample with a content of 3 g/kg of AquaGel superabsorbent.

Compared to the base sample, on average, for each of the studied days of hardening, the shrinkage rate of all samples containing SAP was reduced by 35%, which justifies their use in order to facilitate the creation and further high-quality functioning of the repair system. The sample with a content of 3.5 g/kg of AquaGel superabsorbent shows the lowest shrinkage rates, taking into account the dosage – by 41% less compared to the rate of the base sample on the 10th day of curing.

The introduction of the investigated SAPs allows to improve the adhesion index by 1.5-2.3 times compared to the basic sample without expansion agents, while maintaining a fairly high level of correlation of this index with the index of shrinkage deformations of the samples for each of the studied days of hardening, which should ensure the maximum possibility of perception of the repaired workload system.

The highest adhesion values of 1.44 MPa and 1.39 MPa were observed in samples with 5 g/kg of SAP Newsorb and 3.5 g/kg of AquaGel, respectively. Taking into account the dosage, the superabsorbent based on sodium polyacrylates increases the adhesive properties of the material by 24% compared to the base sample.

All tested samples of cement mortar containing SAP expansion agents, except for sample 4, according to the adhesion index correspond to the repair material class RM3 according to [23] and classes R1-R2 according to [4], according to the index of shrinkage deformations correspond to the classes RM1-RM2 according to [23], and can be used as non-structural repair systems.

References

- [1] Inès L. Tchegnina Ngassam, "A new approach for the mix design of (patch) repair mortars", *Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, vol. 10, Iss. 3, pp. 259-265, 2018.
- [2] Peter A., "Claisse. Mortars and grouts", *Civil Engineering Material*, pp. 303-311, 2016.
- [3] Quality, Efficiency, Sustainability and Available Standards of Dry Mix Mortars. URL: <https://www.dow.com/content/dam/dcc/documents/en-us/tech-art/840/840-01801-01-quality-efficiency-sustainability-and-available-standards-of-dry-mix-mortars.pdf>. Accessed on: May 13, 2022.
- [4] EN 1504-1:2003. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions. Requirements. EUSC, 2003.
- [5] L. Courard, B. Bissonnette, "Compatibility performance as a fundamental requirement for the repair of concrete structures with self-compacting repair mortars", *RILEM PRO 54*, pp. 667-675, 2008.
- [6] Grażyna Łagoda, Tomasz Gajda, "Change of Mechanical Properties of Repair Mortars after Frost Resistance Rests", *Materials (Basel)*, Iss. 14(12), p. 3199, 2021.
- [7] L. Courard, "Parametric study for the creation of the interface between concrete and repair products", *Mater. and Struct.*, Iss. 3, pp. 65-72, 2000.
- [8] L. Courard, F. Garbacz, "Failure of concrete repair: how to avoid it", *RILEM PRO 51*, vol. 1, pp. 167-191, 2006.
- [9] Qianjin Mao, Jiayi Chen, Wenjing Qi, "Improving Self-Healing and Shrinkage Reduction of Cementitious Materials Using Water-Absorbing Polymer Microcapsules", *Materials (Basel)*, Iss. 15(3), p. 847, 2022.
- [10] K. van Tittelboom, N. De Belie, "Self-healing in cementitious materials", *A review*.

- Materials*, Iss. 6, pp. 2182-2217, 2013.
- [11] H. Benoit, K.V. Tittelboom, G. Elke, N. De Belie, A. Loukili, "Design of polymeric capsules for self-healing concrete", *Cem. Concr. Compos.*, Iss. 55, pp. 298-307, 2015.
- [12] A. Blanc, S. Faure, T. Le Roy-Delage, "Autogenous Shrinkage of Hardening Cement Paste", *Building journal Poromechanics*, vol. 8, pp. 217-219, 2011.
- [13] Powder additives for dry mix mortars with rising demands. URL: https://www.acat.com/files/get/3b4c90c0f27766b6a16146edc2b80831/pulveradditivefrtrockenmrtelfrsteigendeanforderungen_en.pdf. Accessed on: May 13, 2022.
- [14] L. Czarnecki, "Adhesion – A challenge for concrete repair", *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, pp. 935-940, 2009.
- [15] H. Beushausen, M. Chilwesa, "Assessment and Prediction of Drying Shrinkage Cracking in Bonded Mortar Overlays", *Cement and Concrete Research*, Iss. 53, pp. 256-266, 2013.
- [16] V. Mechtcherine, "Polimery superabsorpcyjne jako nowe domieszki do betonu", *Zakłady Betonowe Int.*, Iss. 2, pp. 34-37, 2012.
- [17] Jung K.-C., Chang S.-H., "Evaluation of shrinkage-induced stress in a runway repaired using compliant polymer concrete". *Compos. Struct.*, Iss. 158, pp. 217-226, 2016.
- [18] K.-C. Jung, I.-T. Roh, S.-H. Chang, "Stress analysis of runway repaired using compliant polymer concretes with consideration of cure shrinkage", *Compos. Struct.*, Iss. 119, pp. 13-23, 2015.
- [19] Tsai-Lung Weng, "Evaluation of cementitious repair mortars modified with polymers", *Sage Journals. Applied System Innovation*, vol. 9, Iss.1, pp. 1578-1586, 2017.
- [20] J. Zhang, D.W. Hou, "Micromechanical modeling on autogenous and drying shrinkages of concrete", *Constr. Build. Mater.*, Iss. 29, pp. 230-240, 2012.
- [21] J.-Y. Long, Zh. Q. Song, "Research on water absorbance of Polycomplex superabsorbent in different mediums", *Chemistry and Industry of Forest Products*, vol. 23, Iss. 4, pp. 27-30, 2003.
- [22] EN 1504-4:2004. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Structural bonding, EUSC, 2004.
- [23] DSTU B V.2.7-126:2011. Sumishi budivelni sukhi modyfikovani. Vyd. ofits., Kyiv, 2011.
- [24] EN 12617-4:2002. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of shrinkage and expansion, EUSC, 2022.
- [25] EN 1323:2007. Adhesives for tiles. Concrete slabs for tests, EUSC, 2007.
- [26] EN 1542:1999. Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Measurement of bond strength by pull-off, EUSC, 1999.
- [27] D. E. Packham, "Some Contributions of Surface Analysis to the Development of Adhesion Theories", *The Journal of Adhesion*, vol. 84, Iss. 3, pp. 240-255, 2008.
- [28] L. Czarnecki, B. Chmielewska, "Uwarunkowania adhezji w złączach budowlanych", *Cement. Wapno. Beton*, Iss. 2, pp. 74-85, 2005.
- [29] B. Chmielewska, G. Adamczewski, R. Wang, Z. Hong Yang, P. Wang, "Application of Wedge Splitting Test for Evaluation of the Bond Strength in Repair System Alumina Cement Concrete vs. PCC Mortar", *Advanced Materials Research*, vol. 1129, pp. 401-408, 2015.
- [30] A. Momayez, M.-R. Ehsani, A.-A. Ramezani-pour, "Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials", *Cement Concrete Res.*, Iss. 35, pp. 748-757, 2005.
- [31] B. Chmielewska, "On the methods of bond strength measurements in concrete repair systems in: L. Czarnecki, A. Garbacz (Eds.)", *Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-scale Approach. Advances in Materials Science and Restoration*, Iss. 2, pp. 29-46, 2007.
- [32] A. Garbacz, L. Courard, B. Bissonnette, "A surface engineering approach applicable to concrete repair engineering", *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, Iss. 61(1), pp. 73-84, 2013.

[33] L. Czarnecki, B. Chmielewska, "Factors affecting adhesion in building joints", *Cement. Lime. Concrete*, Iss. 2, pp. 74-85, 2005.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ РОЗШИРЮВАЛЬНИХ АГЕНТІВ У РЕМОНТНИХ РОЗЧИНАХ З СУХИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ УМОВ ТВЕРДІННЯ

¹Гедуляк С.І., к.т.н.,
shedulian@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0001-5732-6042

¹Гара О.А., к.т.н., професор,
garaogasa@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2413-1860

¹Савченко С.В., к.т.н., доцент,
koval_sv@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4973-0552

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

Анотація. В статті наведено дослідження можливості підвищення сумісності ремонтних розчинів на основі сухих будівельних сумішей з пошкодженими бетонними та залізобетонними конструкціями та спорудами за рахунок покращення умов твердіння таких матеріалів через порівняльний аналіз показників адгезійної міцності та лінійної усадки цементних зразків з використанням різних типів суперабсорбентів, а саме SAP Newsorb на основі поліакрилатів натрію японського виробника Newstone, китайського MNC-SAP на основі поліакрилатів калію від MUSHU Construction Materials та AquaGel на основі зшитого сополімеру акриламідів та акрилату калію від австралійської Baroid.

Отримані під час експериментальних досліджень дані показують, що використання досліджуваних домішок суперабсорбентів SAP внаслідок покращення умов гідратації в цементній матриці ремонтного матеріалу може частково компенсувати зростання деформацій усадки, що, в свою чергу, дещо покращує показники адгезійної міцності зчеплення з поверхнею пошкодженої конструкції.

Встановлений позитивний вплив використання зазначених полімерних домішок на досліджувані цементні розчини. У порівнянні з базовим зразком в середньому на кожні з досліджуваних діб твердіння показник усадки всіх зразків, що містили SAP, знижений на 35%, що виправдовує їх застосування з метою полегшення створення та подальшого якісного функціонування ремонтної системи. Введення досліджуваних SAP дозволяє покращити показник адгезії у 1,5-2,3 рази порівняно із базовим, що має забезпечити максимальну можливість прийняття відремонтованою системою робочого навантаження.

Визначено оптимальні вмісти домішок SAP у складі досліджуваних цементних розчинів для зниження показників усадкових деформацій та підвищення адгезійної міцності. Отримано склади неконструкційних ремонтних цементних розчинів класу РМ3 та R1-R2 за адгезійної міцністю та класів РМ1-РМ2 за показником усадкових деформацій відповідно до українських та європейських норм.

Ключові слова: ремонтні розчини, сухі будівельні суміші, розширювальні агенти, суперабсорбенти, адгезія, лінійна усадка.

Стаття надійшла до редакції 21.06.2022

METHODS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF NOISE POLLUTION FROM ROAD TRANSPORT AND ACOUSTIC PARAMETERS OF NOISE PROTECTION SCREENS

Sergii Laslov, Researcher,
sl25051982@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6961-8613
National Transport University
M. Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010

Abstract. A review of scientific work on the main sources of noise from road transport and its impact on human health. Measures to reduce the level of noise load on the environment are analyzed.

It is established that in projects of construction and reconstruction of highways measures of reduction of noise loading of motor transport on adjoining territories to highways, especially within settlements, should be considered.

The method is given and experimental measurements of noise load from highways to the adjacent territories depending on the distance from the noise source to the residential area are carried out. It was found that the equivalent sound level in the area adjacent to the residential area, at a distance of 2 m is 74.4 dBA, and the maximum sound level – 78.0 dBA. When measuring the noise characteristics at a distance of 1 m in front of the noise shield, the equivalent sound level was 88.6 dBA, and the maximum sound level was 103.9 dBA. At a distance of 2.4 m from the noise shield, the equivalent sound level was 70.7 dBA, and the maximum sound level was 89.8 dBA.

It was found that during the experimental measurements at a distance of 19.5 m from the existing highway and at a distance of 2 m from residential buildings, the measured equivalent noise level exceeded the established normative value by 19.4 dBA, and the measured maximum noise level exceeded the established normative value by 8.0 dBA.

Experimental measurements of acoustic efficiency parameters of noise protection screens were performed. It is established that noise protection screens are effective means of reducing the noise transport load on the environment. At a distance of 2 m from the noise protection screen, the acoustic efficiency of the screen is 11-16 dBA.

Key words: highway, noise load, experiment, noise protection screens.

Introduction. Significant increases in the intensity of traffic, increasing the power of car engines and increasing speeds of road transport cause acoustic pollution. It should be noted that today noise pollution has become one of the main polluters of the environment. It should be noted that all organs of the human body react negatively to the increase in noise levels in the environment. According to the World Health Organization (WHO), constant man-made noise disrupts a person's psychological comfort, and also leads to various diseases, not only of the hearing aid, but also of the nervous and cardiovascular systems [1]. In the countries of the European Union, much attention is paid to reducing the noise level from road transport in the environment. This problem is solved when designing the construction and reconstruction of roads. Noise protection measures are planned in the settlements adjacent to the highway: additional landscaping, noise protection screens, etc.

The problem and its relevance. The noise load from road transport is influenced by many factors. Some of them are the technical condition of the road surface and terrain, others the performance of cars.

Vehicle noise is mainly caused by three factors: exhaust pipes, vehicle engines and tires that interact with the road surface. Each of these factors reproduces sound energy, which, in turn, is a source of moving and vibrating sound waves – fluctuations in atmospheric pressure. These sound pressure fluctuations are usually reflected in the sound pressure and are measured in micronewtons per 1 m² ($\mu\text{N}/\text{m}^2$) or in micropascals (μPa). Usually the sound pressure is in the range from 20 to 200 μPa . Due to

this scatter, the sound pressure is measured on a logarithmic scale (Fig. 1). On this scale, a value of 0 dB is equal to a sound pressure level (SPL) of 20 μPa and corresponds to the hearing threshold for most people. The value of 140 dB is equal to SPL 2×10⁸ μPa and is the threshold of pain for most people.

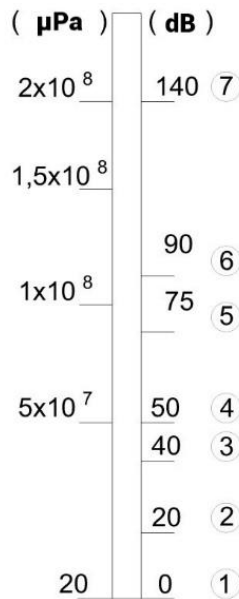


Fig. 1. Scale of sound levels: 1 – limit of audibility; 2 – rustling of leaves; 3 – "sleeping" area at night; 4 – restaurant without music; 5 – continuous traffic flow at a distance of 30 m; 6 – jet aircraft at an altitude of 300 m; 7 – pain threshold

To express the energy of sound, or the pressure of sound in SPL, or in dB, the following equation is used:

$$SPL = 10 \times \lg(P/P_{ref})^2, \tag{1}$$

where P – is the sound pressure; P_{ref} – sound pressure equal to 20 μPa.

It should be noted that the trajectory of sound propagation is different. It depends on the presence of obstacles.

The next characteristic of sound is amplitude, or volume. Sound sources produce sound energy, which, in turn, creates micro fluctuations in atmospheric pressure.

Another characteristic of sound is its frequency, or tonality, measured in Hz, or the period of oscillations per second.

Thus, the sound impression received by a person is greatly influenced by a person's condition: fatigue, previous irritation with sound, simultaneous sound of other sources (so-called masking) and much more. In addition, at sufficiently large amplitudes of sound in the human auricle there are nonlinear distortions: higher harmonics in the case of sinusoidal tone, higher harmonics and combination tones in non-sinusoidal tone.

Therefore, the development of methods for estimating and reducing traffic noise from highways to the environment and conducting experimental measurements of noise load when moving cars is an urgent task of research.

Analysis of recent research and publications. In research works [2, 3] the results of research on noise reduction through the use of improved geometric shape of the car tires and improved road surface design are presented. However, it should be noted that road safety should be ensured first of all when developing measures to reduce noise load.

In [4] it is noted that the level of noise load on the environment depends on the temperature and humidity parameters of the environment. It is established that with increasing temperature and humidity, the speed of sound increases [5].

In addition, it was noted in [6] that, depending on atmospheric conditions, the sound level can vary between 6–10 dB.

Numerous studies of the influence of pavement materials on noise characteristics have been carried out in [3]. It was found that a thin smooth layer of bitumen reduces the noise level by 4-5 dBA compared to the noise level on roads with ordinary asphalt pavement.

However, in [4] it was noted that a smooth road surface reduces the noise level, but does not ensure the safety of cars in wet weather.

In scientific works [7–9] the issues of selection of optimal parameters and materials of noise protection screens and their efficiency of application on highways are considered. The issues of visual perception of the screen by road users and their integration with the surrounding areas are presented.

Therefore, the development of the transport network requires the development of effective measures to reduce noise pollution. Therefore, the topic of scientific work is relevant and timely.

The aim of research is the development of a method for experimental assessment of the noise load of roads on the environment and measurements of noise load depending on the technical condition of roads and parameters of noise screens.

Research methodology. Experimental studies of noise pollution on the environment were conducted in areas of roads that are close to settlements. The noise characteristics of the traffic flow were determined before the noise protection screen and at a distance of 2 m after it. In addition, the maximum and equivalent sound levels were determined in the settlement area, which is close to the highway. The measurement was performed 2 m before the fence of the house, if any, or 2 m before the house at a height of 1.2-1.5 m from the surface level. Also, the measurement method involved determining the temperature, humidity and wind direction, atmospheric pressure and air velocity; traffic intensity and traffic flow composition; number of lanes; the distance from the axis of the extreme lane (noise source) to the noise shield; height and technical condition of the screen; the distance from the noise source to the measuring point in the residential area and the profile of the highway at the place of measurement.

The type of noise protection screens on which measurements were made, located on the Kyiv-Chop highway, is shown in Fig. 2. They have the following physical characteristics: the material from which the screens are made – steel sheet (perforated), plastic (transparent or translucent of different colors); screen height – from 2.5 m to 3.9 m.

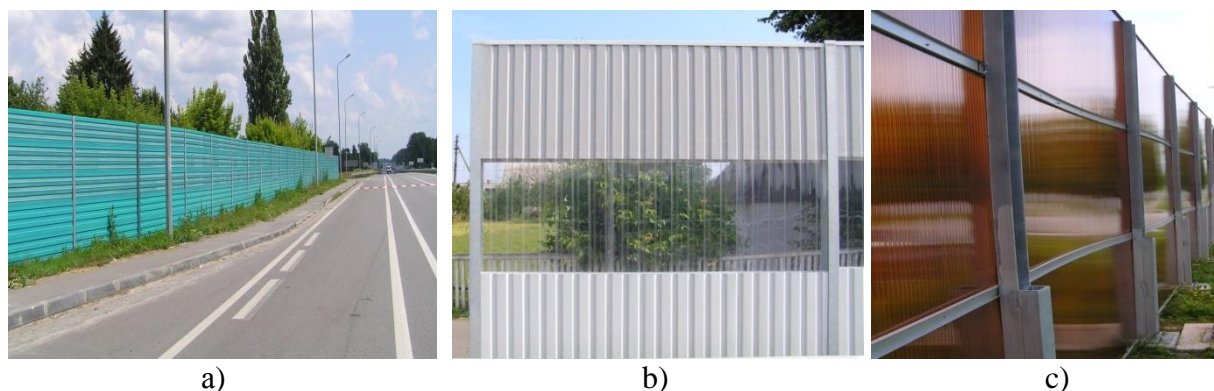


Fig. 2. Noise protection screens on the Kyiv-Chop highway:

a – steel perforated sheet; b – screen with a transparent part (157 km, Berezivka village, Kyiv region); c – plastic screen (238 km, Zhytomyr region)

The following equipment was used to measure the noise of traffic flows: Octave 110A № AO60114 noise meter, electronic weather station type WM-918, wing anemometer, ASO-3 and roulette.

The estimated equivalent noise level from the traffic flow at a distance of 7.5 m from the axis of the nearest lane of the paved highway is determined by the formula:

$$L = 50 + 8,8 \lg N, \quad (2)$$

where L – is the equivalent noise level of dBA; N – perspective traffic intensity, bus/hour.

The value of the equivalent (energy) sound level L_A , dB is determined by the formula:

$$L_A = 10 \lg \left[\frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \right], \quad (3)$$

where $p_A(t)$ – sound pressure, which changes over time, measured with the frequency response "A" of the noise meter, PA; p_0 – threshold value of pressure equal to $2 \cdot 10^{-5}$ Pa; T_m – duration of noise measurement, min.

The width of the interval of sound levels must be less than or equal to 5 dBA. Average sound level L_i in i – intervals of sound levels are determined by the formula:

$$L_i = \frac{L_l + L_u}{2}, \quad (4)$$

where L_l – the lower limit of the interval of sound levels, dBA; L_u – the upper limit of the interval of sound levels, dBA.

Results of experimental measurements of noise load from highways. Measurements of noise characteristics of traffic flow were carried out on the highway of Zhytomyr region. Schematic situational plan of the area where measurements were carried out on the highway Kyiv-Chop km 238 + 740 is shown in Fig. 3.

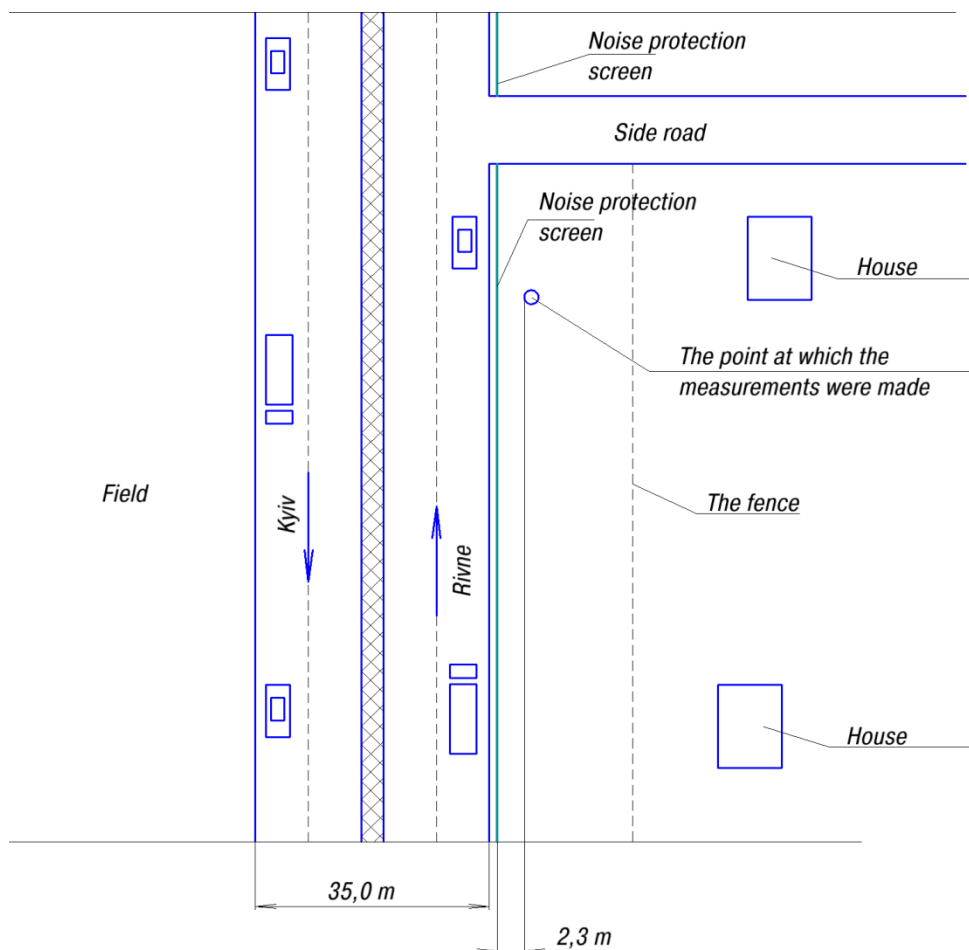


Fig. 3. Schematic situational plan of the section of the Kyiv-Chop highway km 238 + 740

The results of experimental measurements of the acoustic efficiency of noise protection parameters of screens located on the roads of Zhytomyr region are given in Table. 1.

Table 1 – The results of experimental measurements of the characteristics of noise protection screens

Name of the highway service	Section of the highway with Noise protective screen, km	Length of Noise protective screen, m	Eq. noise level before Noise protective screen, dBA	Eq. noise level at a distance of 2 m per Noise protective screen, dBA	Efficiency, dBA
Zhytomyr region (to the right)	237+920 – 238+685	765	87	71	16
	238+740 – 238+780	40	84	72	12
	238+830 – 238+880	50	86	74	12
	239+375 – 239+450	75	86	73	13
	239+520 – 239+580	60	85	72	13
	239+610 – 239+670	60	85	72	13
	239+680 – 239+740	60	86	73	13
	239+870 – 239+930	60	84	71	13
	246+920 – 247+020	100	85	70	15
	247+040 – 247+110	70	85	71	14
	247+190 – 247+150	60	86	72	13
	247+260 – 247+315	55	86	74	12
	247+780 – 247+840	60	86	74	12
	247+850 – 247+885	35	84	73	11
	248+210 – 248+325	115	84	70	14
	248+345 – 248+390	45	85	73	12
	248+470 – 248+520	50	86	74	12
	248+560 – 248+650	90	84	69	15
	248+665 – 248+715	50	84	72	12
	248+722 – 248+920	198	86	70	16
	248+990 – 249+090	100	86	71	15
	250+096 – 250+180	84	85	71	14
	250+220 – 250+500	280	86	70	16
	250+650 – 251+420	770	85	69	16
251+530 – 251+590	60	84	72	12	
Zhytomyr Region (to the left)	247+010 – 247+110	100	84	69	15
	247+130 – 247+230	100	85	70	15
	247+440 – 247+500	60	85	73	12
	247+977 – 248+010	33	85	74	11
	248+420 – 248+750	330	86	71	15

The results of experimental studies have shown that the equivalent sound level in the area adjacent to the residential area, at a distance of up to 2 m is 74.4 dBA, and the maximum sound level – 78.0 dBA.

When measuring the noise characteristics at a distance of 1 m in front of the noise shield, the equivalent sound level was 88.6 dBA, and the maximum sound level was 103.9 dBA. At a distance of 2.4 m from the noise shield, the equivalent sound level was 70.7 dBA, and the maximum sound level was 89.8 dBA.

Table 1 shows that the acoustic efficiency of noise protection screens on the highway in the Zhytomyr region is 11-16 dBA.

During the experimental measurements at a distance of 19.5 m from the existing highway and at a distance of 2 m from residential buildings: the measured equivalent noise level exceeded the set normative value by 19.4 dBA, and the measured maximum noise level exceeded the set normative value by 8.0 dBA.

Conclusions. As a result of experimental measurements of noise load from roads in the surrounding area, the following conclusions can be drawn:

1. The task of reducing the impact of road traffic noise on the environment should be considered in projects for the construction and reconstruction of roads.
2. The analysis of the characteristics of noise protection screens on the Kyiv-Chop highway in Zhytomyr region made it possible to establish that the acoustic efficiency of noise protection screens is 11-16 dBA.
3. It was established that the equivalent sound level in the area adjacent to the residential area, at a distance of up to 2 m was 74.4 dBA, and the maximum sound level – 78.0 dBA.

References

- [1] SHumove zabrudnennya. [Online]. Available: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%83%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%B5_%D0%B7%D0%B0%D0%B1%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F.
- [2] C. G. Gordon, W. J. Galloway, B. A. Kugler, D. L. Nelson, *NCHRP Report 117: Highway Noise. A Design Guide for Highway Engineers*. HRB, National Research Council, Washington, D.C., 1971.
- [3] G. Fleming, E. Gregg, Rickley, *Performance Evaluation of Experimental Highway Noise Barriers*. Report No. DOT-VNTSC-FHWA-94-16 and FHWA-RD-94-093. Cambridge MA: John A. Volpe National Transportation Systems Center, 1994.
- [4] D. Banerjee, "Ambient Noise Level around an integrated Iron & Steel works", *Bulletin of National Institute of Ecology*, 32(4), pp.144–146, 2006.
- [5] G. Fleming, E. Gregg, Rickley, *Parallel Barrier Effectiveness: Dulles Noise Barrier Project*. Report No. FHWA-RD-90-105 and DOT-TSC-FHWA-90-1. Cambridge MA: U.S. Department of Transportation, John A. Volpe National Transportation Systems Center, Acoustics Facility, 1990.
- [6] A. Ahmed, M. A. Fahim, & H. S. Seddeq, "Noise prediction for outdoor cooling systems; case study", *Journal of American Science*, 6(11), pp. 899–905, 2010.
- [7] *Highway Noise Barriers: Performance, Maintenance and Safety (Video)*. Cambridge, MA: John A. Volpe National Transportation Systems Center, 1996.
- [8] *Summary of Noise Barriers Constructed By December 31, 2010*. – Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 2012.
- [9] *Highway Noise Barrier Design Handbook*. Prepared by Gregg G. Fleming, Harvey S. Knauer, Cynthia S.Y. Lee, Soren Pedersen, 2000.
- [10] S. Castineira-Ibanez, *Characterization of an Acoustic Barrier Made up of arrangements of Multi-Phenomena Cylindrical scatterers based on Fractal Geometries Eurnoise*. Prague, 2012.
- [11] G. Jonasson Hans, *Nord 2000. New Nordic prediction method for rail traffic noise*, SP Hallbar Samhallsbyggnad, Ljud och vibration. Storeheier, Svein, SINTEF, 2001 DOI:10.1006/jsvi.1996.0268.
- [12] Pachaiyannan Partheeban, Krishnamurthy Karthik, Partheeban Navin Elamparithi, Krishnan Somasundaram, Baskaran Anuradha, "Urban road traffic noise on human exposure assessment using geospatial technology", *Environmental Engineering Research*, 27(5), 210249, 2022.
- [13] L. Maine, L. Sharma, D. Franzen, "Use of corn height measured with an acoustic sensor improves yield estimation with ground based active optical sensors", *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016. DOI:10.1016/j.compag.2016.04.016.
- [14] D. Kapski, V. Kasyanik, O. Lobashov, A. Volynets, O. Kaptsevich, A. Galkin, "Estimating the Parameters of Traffic Flows on the Basis of Processing of Localization Data on the Movement of Vehicles", *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, 21(2), pp. 89-99, 2019.

- [15] M. Gallo, *A piecewise-defined function for modelling traffic noise on Urban Roads*. MDPI, 2020, DOI:10.3390/infrastructures5080063.
- [16] M. Melnyk, M. Lobur, I. Vasyliuk, V. Mazur, N. Hemich, "The mathematical model of length defining position of dominated noise source in traffic flow", Proc. of the XI Intern. Conf. on the experience of designing and application of CAD systems in microelectronics (CADSM'2011). Lviv – Polyana: Publishing House Vezha & Co, 2011.
- [17] R. K. Mishra, M. Parida, S. Rangnekar, "Evaluation and analysis of Traffic Noise Along Bus Rapid Transit System Corridor", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2010. DOI:10.1007/BF03326183.
- [18] M. Maghrour Zefreh, A. Torok, "Theoretical comparison of the effects of different traffic conditions on Urban Road Traffic Noise", *Journal of Advanced Transportation*, 2018. DOI:10.1155/2018/7949574.
- [19] I. M. Beca, M. Iiescu, "The Sunet System for Monitoring Noise Pollution in Cluj-Napoca", *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, 6(2), pp. 33-44, 2017.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ШУМОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ВІД АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ ТА АКУСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ШУМОЗАХИСНИХ ЕКРАНІВ

Ласлов С.В., науковий співробітник,
sl25051982@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6961-8613
Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010

Анотація. Проведено огляд наукових робіт стосовно основних джерел шумового навантаження від автомобільного транспорту та його вплив на стан здоров'я людей. Проаналізовано заходи зниження рівня шумового навантаження на оточуюче середовище.

Встановлено, що у проєктах будівництва і реконструкції автомобільних доріг повинні розглядатися заходи зменшення шумового навантаження автомобільного транспорту на прилеглі території до автомобільних доріг, особливо у межах населених пунктів.

Наведено методику та проведено експериментальні вимірювання шумового навантаження від автомобільних доріг на прилеглі території у залежності від відстані від джерела шуму до житлової зони. Встановлено, що еквівалентний рівень звуку на ділянці прилеглий до житлової зони, на відстані до 2 м становить 74,4 дБА, а максимальний рівень звуку – 78,0 дБА. При вимірюванні шумових характеристик на відстані 1 м перед шумозахисним екраном еквівалентний рівень звуку становив 88,6 дБА, а максимальний рівень звуку – 103,9 дБА. При відстані до шумозахисного екрану 2,4 м еквівалентний рівень звуку складав 70,7 дБА, а максимальний рівень звуку – 89,8 дБА.

Встановлено, що при експериментальних вимірюваннях на відстані 19,5 м від існуючої автомобільної дороги та на відстані 2 м до житлової забудови вимірюваний еквівалентний рівень шуму перевищував встановлене нормативне значення на 19,4 дБА, а вимірюваний максимальний рівень шуму перевищував встановлене нормативне значення на 8,0 дБА.

Проведено експериментальні вимірювання параметрів акустичної ефективності шумозахисних екранів. Встановлено, що шумозахисні екрани є ефективними засобами зменшення шумового транспортного навантаження на навколишнє середовище. При відстані 2 м від шумозахисного екрану акустична ефективність екрану становить 11–16 дБА.

Ключові слова: автомобільна дорога, шумове навантаження, експеримент, шумозахисні екрани.

Стаття надійшла до редакції 15.06.2022

COMPOSITES BASED ON SECONDARY POLYVINYL CHLORIDE RAW AND WOOD WASTE

¹**Nevinsky A.G.**, PhD., Associate Professor,
nevinsky54@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7168-0299

¹**Chvyr V.A.**, graduate student,
vip.chvir@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3136-4408

¹*Petro Mohyla Black Sea National University*
street 68 Desantnykiv, 10, Mykolaiv, 54000, Ukraine

Abstract. A solution to the problem of rational use of secondary polymeric raw materials and wood waste is presented by creating composite materials for structural and decorative purposes on their basis.

Wood-polymer composites (WPC) are modern materials made from a mixture of an organic thermoplastic polymer and a plant-based filler. To obtain WPC, various fillers and thermoplastic binders are used. Work in this direction is being actively carried out and the production of WPC (molded, sheet, complex profile) is widely mastered in the world.

In order to significantly reduce the cost of composites while maintaining their physical, mechanical and operational characteristics, studies were carried out on the use of secondary raw materials as the main raw material. The object of the study was the most large-tonnage types of waste polymeric thermoplastic materials, in particular, polyvinyl chloride, which is formed both in the process of its industrial production, and in the field of industrial and domestic consumption, as well as soft waste from sawmilling and woodworking (sawdust, shavings).

In the studies, the direct extrusion method was used.

Based on the results of a complex of studies, the optimal technological parameters of the extrusion processing mode of the developed press compositions were determined, which have sufficient manufacturability and ensure high physical, mechanical and operational performance of the created composites at their minimum cost.

The optimal content of the modified polymer component in the press composition should be in the range of 40–50% wt., depending on the purpose of products from this composite. From a wide range of additives, only the most, in our opinion, significant and affordable additives were used: calcium stearate (stabilizer and lubricant), dioctyl phthalate (plasticizer). These additives provide the necessary thermal stability and fluidity of the press composition during extrusion, as well as a certain light and thermal stability during product operation.

The best performance is for a composite based on wood particles of medium fraction ($l = 2.0 \dots 8.0$ mm), which is characterized by an optimal structure of reinforcing particles and uniform distribution of the binder.

Comprehensive evaluation tests (physical-mechanical, technological, operational, sanitary and hygienic) of WPC based on polyvinyl chloride waste and soft wood waste showed the practical possibility and expediency of creating and mastering the production of structural and decorative and finishing profile elements that are not inferior in basic properties to coniferous wood products rocks or polymers. On an industrial scale, on the basis of domestic equipment, in particular, the WP 90×25 extruder with modified working bodies, a wide range of products has been launched (for example: flooring profiles for civil and industrial construction, finishing boards, platbands, plinths, etc.).

Keywords: wood-polymer composites, press composition, polyvinyl chloride waste, wood waste, direct extrusion method.

Introduction. One of the promising ways of rational use of secondary polymer raw materials (production waste, depreciated products, etc.) and wood waste is the creation of wood-polymer

composite materials and products (WPC) for structural and decorative and finishing purposes on their basis. The promise and competitiveness of the created composites is due to the fact that in terms of their basic physical, mechanical and operational properties they are not inferior to most traditional materials (from the same polymers and wood) and at the same time surpass them in terms of efficiency [1–4].

Analysis of recent research and publications. The term "wood-polymer composites (wood-plastic composites)" in modern foreign and domestic literature is applied to materials obtained from a mixture of an organic thermoplastic polymer and a filler of plant origin. To obtain wood-polymer composites (WPC), a variety of fillers and thermoplastic binders are used. Works in this direction are actively carried out and the production of WPC (molded, sheet, complex profile) is widely mastered by a number of manufacturers in the world [5–8].

From the available information, it follows that the well-known composite formulations use specially prepared fine wood (wood flour, needle-shaped shavings, wood fibers, etc.), primary polymer raw materials, and various additives. The high cost of all these components is a significant brake on the wide development of the industrial production of the developed composites.

Purpose and tasks. In order to significantly reduce the cost of composites while maintaining their physical, mechanical and operational characteristics, studies were carried out on the use of secondary raw materials as the main raw material. The object of the study was the most large-tonnage types of waste polymeric thermoplastic materials, in particular, polyvinyl chloride [9], which is formed both in the process of its industrial production, and in the field of industrial and domestic consumption, as well as soft waste from sawmilling and woodworking (sawdust, shavings).

The screw extrusion method for processing wood-polymer mixtures (press compositions) into WPC was chosen after a detailed analysis of its advantages over other methods.

Materials and methods of research. At the stage of the exploratory experiment, the primary raw materials of polyvinyl chloride suspension (PVCS) and polyvinyl chloride emulsion (PVCE) powder were used as a polymer matrix material. At the next stage of research, the results of which are presented in this article, primary raw materials were replaced by secondary ones. The production wastes of suspension polyvinyl chloride (WPVCS) and emulsion polyvinyl chloride (WPVCE) were used, as well as the mass of finely dispersed shock-absorbing plastic products made of polyvinyl chloride (WPVC).

The reinforcing filler in the press compositions was soft wood waste (sawdust, machine shavings, small chips, mainly coniferous species), cleaned of foreign impurities and large inclusions, dried to a moisture content of not more than 2 ... 3% wt.

From a wide range of additives, only the most, in our opinion, significant and affordable were used:

- stabilizer and lubricant – calcium stearate (non-toxic, relatively inexpensive, quite effective);
- plasticizer – dioctyl phthalate (highly effective plasticizer of domestic production, relatively inexpensive).

These additives provide the necessary thermal stability and fluidity of the press composition during extrusion, as well as a certain light and thermal stability during product operation.

The preparation of the press composition, the refinement of the recipe and the technology for manufacturing prototypes of composites were carried out using a paddle mixer of thermoplastics (non-standard equipment, heated, temperature 70 ± 2 °C, rotation speed 28 ± 2 rpm), and a single-screw worm press brand "Reifenheiser" (screw diameter 63 mm, screw length to diameter ratio 20:1, screw for PVC processing), equipped with a die head (die), in the following sequence:

- dosage of prepared initial components by weight method;
- thermal plasticization of the polymer component by successive mixing of WPVC with a stabilizer (3...5 min.) and a plasticizer (irrigation of the continuously stirred mixture for 5...7 min.);
- mixing of the prepared polymeric component with wood raw material for 7...10 min.

In the studies, the direct extrusion method was used. The freshly prepared press composition was fed directly into the feed hopper of the worm press for molded product extrusion. At this stage

of research, a die was used to form a square bar 20×20 mm, directly intended for evaluation tests.

The product waste generated during extrusion was crushed and the mass was returned for recycling at the stage of mixing the components.

Research results. Based on the results of experiments on the development of extrusion technology, the optimal parameters of the extrusion mode were determined (Table 1).

Table 1 – Extrusion parameters of WPVC – wood press composition

Polymer component of the press composition	Temperature regime by worm press zones, °C					Speed of rotation of the screw, rpm	Productivity, m/min
	I	II	III	IV	die		
WPVCE	90	120	140	150	150	12...15	0.6...0.7
WPVCS	100	130	150	160	160	10...12	0.5...0.6
WPVC blend (powdered/crushed=1:1)	100	130	160	170	170...180	to 10	0.4...0.5

The determination of the optimal prescription compositions of composites was carried out on the basis of the results of studies of the dependence of the properties of the composite on the following factors:

- concentration and composition of the polymer component (matrix material);
- nature and fractional composition of the wood component;
- concentrations of modifying additives, etc.

The following criteria were adopted as the main evaluation criteria: the strength limit in static bending and water absorption in one day of WPC samples made according to a certain recipe. Samples were tested according to standard methods.

The results obtained are presented in Table. 2-4.

Table 2 – Dependence of the physical and mechanical characteristics of WPC on the content of the polymer component (the content of additives is 5%)

Polymer component	Meaning of indicators: flexural strength, MPa/water absorption, % wt.						
	from the mass fraction of the polymer component in the compound, % wt.						
	25	30	40	50	60	70	80
WPVCS	2.8/–	6.5/19.8	12.2/12.7	16.4/7.5	15.8/4.7	16.7/4.0	16.6/4.1
WPVCE	–	7.1/21.9	11.0/13.8	13.4/8.0	14.1/6.5	15.3/5.7	15.2/–
WPVC blend	–	–	7.6/19.5	10.2/17	10.8/14	11.8/8.1	11.3/7.1

From the data in Table. 2 shows that the creation of composites with stable properties containing a polymer component in an amount of less than 25% wt. practically not feasible. Press compositions containing 30% wt. WPVCS or WPVCE are technologically advanced and allow obtaining WPC samples with reproducible performance. When using as a matrix material a mixture of WPVC powder with finely dispersed cushioned PVC products in a ratio of 1:1 (WPVC blend), the minimum content of the matrix material in the press composition should be at least 40% wt.

With an increase in the content of the polymer component (WPVCS or WPVCS) from 30 to 60% wt., and the WPVCS mixture up to 70-80% wt. the water absorption of composites sharply decreases to a certain minimum, which is explained by the formation of a continuous polymer film on the surface of wood filler particles, which prevents the penetration of water into the capillary-porous system of wood particles. In the case of using a polymer material in an initially more highly dispersed form, a greater effect of waterproofing filler particles is achieved, especially in the region of low polymer concentrations.

The dependence of the increase in the strength characteristics of composites on an increase in the content of the polymer component (or, which is the same, a decrease in the degree of filling of the composites) in the range from 30 to 60% wt. has the following character: for WPVCS – extreme, for WPVCS and WPVC blend – at first intense, turning into monotonous. With an increase in the proportion of polymer in the composite up to 80% wt. a monotonous increase in strength is observed. This is most likely due to the weak reinforcing effect of wood particles, which have approximately similar dimensions in length, width, and thickness. With a low content of the polymer phase in the composite, there is no solidity of the polymer interlayers between the wood particles, which leads to low strength. With an increase in the polymer content, its uniform distribution over the volume of the composite occurs and the formation of a continuous polymer skeleton (as a result, an intensive increase in strength), and then an increase in the thickness of the interlayers between wood particles (a monotonous increase in strength).

Based on the results obtained, considering the economic factor, it can be concluded that the optimal content of the modified polymer component in the press composition should be in the range of 40–50 wt.%, depending on the purpose of products from this composite.

Table 3 shows the physical and mechanical properties of WPC samples obtained on the basis of wood pulp of various nature and fractional composition. The ratio of components in the composite was constant: dispersed wood pulp – 50%, polymer component – 45%, modifying additives – 5%.

Table 3 – Dependence of the physical and mechanical properties of composites on the nature and fractional composition of the filler

The name of indicators	The value of the indicator when used as a filler					
	wood pulp fraction, mm			crushed grapevine fr. 2.0-8.0	wood pulp special preparation	wood /flax fire mixes
	less 2.0	2.0-8.0	8.0-20.0			
1	2	3	4	5	6	7
Ultimate strength in static bending, MPa	12.0	15.2	13.7	15.2	18.9	19.4
Water absorption, %	11.0	7.8	7.0	7.8	6.5	7.2

From the data in Table 3 it follows:

1. The nature of the wood filler (hardwood or coniferous wood, grapevine, etc.) does not significantly affect the properties of composites (columns 3, 5), if the particles of various fillers do not differ significantly in their strength, geometry, fractional composition, moisture content, etc. indicators.

2. With an increase in the fraction, the physical and mechanical characteristics of the samples improve (columns 2-4). This is due to the fact that with an increase in the linear dimensions of the particles, the ratio of the surface area of the particles to their volume decreases, i.e. at a given consumption of the binder, the thickness of the polymer interlayers between the particles increases to the optimum. In addition, there is a reinforcement effect, which significantly increases the strength properties of the composite. The best performance is for a composite based on wood particles of medium fraction ($l = 2.0 \dots 8.0$ mm), which is characterized by an optimal structure of reinforcing particles and uniform distribution of the binder.

3. The influence of the reinforcing effect is clearly manifested if, instead of a filler based on wood waste, a specially prepared (chopped and sifted) wood pulp of a fraction of 5.0 ... 10.0 mm is used in the form of needle-shaped particles with a length-to-thickness ratio in the range of 5 ... 10 (column 6), and also if instead of 50% wt. wood filler with a fraction of 2.0 ... 8.0 mm, use chopped flax fire fibers up to 20 ... 25 mm long (column 7).

As shown by the results of experimental work, a significant factor affecting the technological and physical and mechanical properties of the composite is the presence and concentration of

various modifying additives. For example, in the Chinese patent [10], it is proposed to use polyvinyl alcohol as a plasticizer in the production of WPC.

The absence of such additives makes the extrusion processing of rigid press compositions problematic; at the same time, an excess of one or another ingredient can play a negative role. Table 4 shows the data on the dependence of the physical and mechanical characteristics of the WPVC-wood composite on the content of the plasticizer used by us – dioctyl phthalate (DOP). It follows from the given data that the optimal ratio of the amount of DOP and WPVC is close to 1 to 10.

Table 4 – Dependence of the physical and mechanical properties of composites on the content of the plasticizer (DOP)

The compound of the press composition, % wt.				Tensile strength at static bending, MPa	Water absorption, %
woody filler	WPVC	DOP	stabilizer		
50	47	2.5	0.5	15.5	10.0
50	45	4.5	0.5	16.5	8.5
50	40	9.5	0.5	13.0	6.5

The complex of conducted studies made it possible to determine the optimal formulations of press compositions that have sufficient manufacturability and provide high physical and mechanical properties of composites at a minimum cost. In Table 5 shows some of them, and in Table 6 comparative estimated physical and mechanical parameters of WPVC-wood composite and pine.

Conclusions. Comprehensive evaluation tests (physical-mechanical, technological, operational, sanitary and hygienic) of WPC based on polyvinyl chloride waste and soft wood waste showed the practical possibility and expediency of creating and mastering the production of structural and decorative and finishing profile elements that are not inferior in basic properties to coniferous wood products rocks or polymers. On an industrial scale, on the basis of domestic equipment, in particular, the WP 90×25 extruder with modified working bodies, a wide range of products has been launched (for example: flooring profiles for civil and industrial construction, finishing boards, platbands, plinths, etc.).

Table 5 – Recipe composition of WPVC-wood press compositions

Name of components	Content, % wt		
	composition I	composition II	composition III
Fine wood waste (sawdust, shavings, industrial chips, etc.) with a moisture content of not more than 3%, preferably a fraction of 2.0-8.0	50.0	60.0	65.0
Recycled polyvinyl chloride, for example, PVCS waste according to TU 6-01-II77 or PVCE waste according to TU 6-01-II79 or others (preferably a mixture of WPVCS: WPVCE = 2:1)	45.0	36.0	31.5
Dioctyl phthalate according to GOST 8728	4.5	3.6	3.2
Calcium stearate or barium stearate according to TU 6-09-4803 or their waste	0.5	0.4	0.3

* Note. In case of replacement of a part of fine-dispersed WPVC with crushed PVC products, composition III is not recommended for use.

Table 6 – Physical and mechanical (estimated) indicators of WPVC-wood composite (composition I from Table 5) in comparison with control samples of pine grade I according to GOST 8486

№	Name of indicator	Evaluation tests were carried out according to the methodology	The value of the indicator for the sample from	
			composite	pin
1	Ultimate compressive strength, MPa	OST 5.9296	27.4	26.6
2	Ultimate strength at stat. bending, MPa	GOST 4648	16.5	55.0
3	Impact strength, kJ/m ²	GOST 4647	2.94	5.43
4	Stiffness coefficient, kN/mm at +22 °C at -20 °C	GOST 16483.2	8.6	8.0
			18.7	8.0
5	Abrasion, %	GOST 16483.39	0.09	0.4
6	Splitting resistance along the fibers across the fibers	GOST 13537	18.7	9.8
				35.7
7	Volumetric weight abs. dry matter, kg/m ³	OST 5.9296	1180.0	560.0
8	Water absorption, % for 1 day for 7 days	OST 5.9296	6.0	47.9
			14.8	86.1
9	Thermal conductivity coefficient, W/m·K	GOST 7076	0.21	0.15

References

- [1] A.S. Kolosova, M.K. Sokol'skaya, I.A. Vitkalova, A.S. Torlova, Ye.S. Pikalov, "Sovremennyye polimernyye kompozitsionnyye materialy i ikh primeneniye", *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, no. 5-1, pp. 245-256, 2018.
- [2] R.R. Safin, R.R. Khasanshin, R.V. Danilova, D.R. Khaziyeva, "Issledovaniye svoystv drevesno-polimernykh kompozitov na osnove termomodifitsirovannogo napolnitelya", *Vest. kazan. gos. tekhn. un-ta*, т. 16, no. 24, pp. 53-55, 2013.
- [3] M.T. Dautbayev, L.N. Ryzhaykin, O.A. Samofalova, "Kompozitsii na osnove polimerov dlya proizvodstv pogonazhnykh izdeliy", *Stroitel'nyye materialy*, no. 5, pp. 18-19, 1992.
- [4] V.M. Shapovalov, V.G. Barsukov, Ye.N. Lapshina, V.I. Gubkin, "Kompozitsionnyye otdelochnyye materialy iz drevesnykh volokon i termoplastov", *Stroitel'nyye materialy*, no. 5, pp. 18-20, 1991.
- [5] A. A. Klosov, *Drevesno-polimernyye kompozity*. SPb: Nauchnyye osnovy i tekhnologii, 2010.
- [6] A. Alireza, "Wood plastic composites as promising green-composites for automotive industries!", *Bioresource Technology*, vol. 99, pp. 4661-4667. 2008.
- [7] K.K. Jin, P. Kaushik, *Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites*. New York: Springer-Verlag, 2010.
- [8] F.P. La Mantia, M. Morreale, "Green composites: A brief review", *Composites: Part A*, vol. 42, pp. 579-588, 2011.
- [9] C.E. Wilkes, J.W. Sammers Dzh., C.E. Daniels, *Polivinilkhlorid*. Handbook. SPb: Professiya, 2007.
- [10] Zayavka CN101885231 (A) YEPV, MPK8 B29C47/00; B29C47/92; C08K13/02; C08K7/02; C08L3/02. Preparation method of fully-degradable polymer wood plastic composite / Zhu Jun; Yanping Yuan; Jiantao Zai; Shanghai Jiaofu New Material Science and Technology Co. Ltd. N 200910051349.7; zayavl. 15.05.2009; opubl. 17.11.2010.

**КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ ВТОРИННОЇ ПОЛІВІНІЛХЛОРИДНОЇ СИРОВИНИ
ТА ВІДХОДІВ ДЕРЕВИНИ**¹Невинський О.Г., к.т.н., доцент,

nevinsky54@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7168-0299

¹Чвир В.А., аспірант,

vip.chvir@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3136-4408

¹Чорноморський національний університет ім. Петра Могили
вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, 54000, Україна

Анотація. Представлено вирішення проблеми раціонального використання вторинної полімерної сировини та відходів деревини шляхом створення на їх основі композиційних матеріалів конструкційного та декоративно-оздоблювального призначення.

Дерев'яно-полімерні композити (ДПК) це сучасні матеріалам, що виготовляються із суміші органічного термопластичного полімеру та наповнювача рослинного походження. Для отримання ДПК застосовують різноманітні наповнювачі та термопластичні в'язучі. Роботи у цьому напрямі активно ведуться і випуск ДПК (погонажних, листових, складнопрофільних) широко освоюється у світі.

З метою суттєвого зниження собівартості композитів при одночасному збереженні їх фізико-механічних та експлуатаційних характеристик було проведено дослідження щодо застосування як основної сировини – вторинної. Об'єктом дослідження було обрано найбільш великотоннажні види відходів полімерних термопластичних матеріалів, зокрема, полівінілхлориду, що утворюється як у процесі його промислового виробництва, так і у сфері виробничого та побутового споживання, а також м'які відходи лісопиляння та деревообробки (тирса, стружка).

У дослідженнях застосовували метод прямої екструзії.

На підставі результатів комплексу проведених досліджень визначено оптимальні технологічні параметри режиму екструзійної переробки розроблених прес-композицій, що мають достатню технологічність і забезпечують високі фізико-механічні та експлуатаційні показники створених композитів за їх мінімальної собівартості.

Оптимальний вміст модифікованого полімерного компоненту у прес-композиції складає 40-50% мас., залежно від призначення виробів з даного композиту. З широкого асортименту адитивів були застосовані лише найбільш, на нашу думку, суттєві та доступні: кальцію стеарат (стабілізатор та мастило), діоктилфталат (пластифікатор). Ці добавки забезпечують необхідну термостабільність та плинність прес-композиції при екструдюванні, а також певну світло- та термостабільність при експлуатації виробів.

Найкращі показники композиту на основі дерев'яних частинок середньої фракції ($l = 2,0...8,0$ мм), для якого характерна оптимальна структура укладання армуючих частинок і рівномірність розподілу в'язучого.

Всебічні оціночні випробування (фізико-механічні, технологічні, експлуатаційні, санітарно-гігієнічні) ДПК на основі відходів полівінілхлориду та м'яких відходів деревини показали практичну можливість і доцільність створення та освоєння випуску конструкційних та декоративно-оздоблювальних профільних елементів, що не поступаються по основним властивостям виробам із деревини хвойних порід або полімерів.

У промисловому масштабі на базі вітчизняного обладнання, зокрема, екструдера ЧП 90×25 з модифікованими робочими органами, налагоджено випуск широкої номенклатури виробів (наприклад: дошка та брус настилів підлоги для цивільного та промислового будівництва, оздоблювальна фасадна дошка, наличники, плінтуси тощо).

Ключові слова: дерев'яно-полімерні композити, прес-композиція, відходи полівінілхлориду, відходи деревини, метод прямої екструзії.

Стаття надійшла до редакції 21.06.2022

**ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING PROPERTIES OF A PRINTED PRODUCT
USING A 3D PRINTER**

¹**Khlytsov N.V.**, PhD., Associate Professor,
color-t@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3486-6833

¹**Bachinsky V.V.**, PhD., Senior Researcher,
slawa_dk@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2187-8616

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

²**Shkurpit O.M.**,
pochta151279@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2010-8057

²**Kondratenko O.I.**,
kondrate88@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8192-8529

²*Military Academy*
10, Fontanska street, Odesa, 65009, Ukraine

Abstract. The article provides an analysis of the use of materials to produce construction products developed using additive technologies. The material samples specified in the article have the prospect of becoming advanced in the modern production of construction products. The main factors that affect the properties of printed material using a 3D printer are also determined.

Today, the production of materials for the manufacture of various architectural structures is developing rapidly, becoming more technological, the volume of production is increasing, the accuracy and quality of the production of parts is increasing, and the costs are reduced. The use of a 3D printer is clearly demonstrated in the optimization of the production of architectural structures. In the case of the usual method of production, their cost and complexity are quite high. The introduction of a 3D printer makes it possible to significantly improve the design and structure of products by improving the structure and consumption of materials.

The conducted research revealed a whole range of issues and problems related to the need to improve the 3D printing process, organization, and management of printing of complex construction products, which would allow effective use of the latest additive 3D printing technologies in modern construction.

The properties of the main materials for 3D printing, which are used in the FDM technology of obtaining the product, have been experimentally determined. The procedure for calculating the performance of the extruder and the main problems during printing are determined.

As a result of the conducted research, it is possible to assert that by basic factors which influence on property of the printed material is a percent of the internal filling is a that thickness of wall of good.

Studies have shown that the use of additive technologies in the production of construction products at the current stage will provide an opportunity to combine the latest scientific developments in the fields of engineering, technology, materials science, architecture, design and construction.

Keywords: additive technologies, 3D printing, filament, structure, extruder.

Introduction. In recent years, there is not a single industry that does not use additive technologies (hereinafter – AT). 3D printing technology such as FDM (Fused Deposition Modeling) is especially widely used. This technology is especially actively used in the production of architectural structures, namely: sculptures, pavilions, bridges, urban installations, building models. A new architectural style has almost been formed with the help of 3D printing – "digital grotesque".

Both cheap home 3D printers and high-precision industrial printers are actively used.

This technology is most effectively used when printing products with complex geometry, mesh and channel structure. FDM parts are usually not printed filled to reduce printing time and save material. Instead, the outer perimeter made by several passes is called the shell, and the inner part is filled with a low-density structure, called filling. It is known that the principle of printing parts by FDM technology is to layer-by-layer build-up of molten plastic thread (filament). At the same time, it is quite obvious that with the improvement of technological equipment and the development of design methods, this direction will steadily expand. However, the use of AT in the printing of inexpensive devices with specific tasks, the use of new innovative materials in their manufacture has not yet been fully explored. Thus, the place of FDM technology in the mass production of construction products, their tasks are not fully defined.

Analysis of research and publications. The market of FDM technologies is actively developing, experiments with printing with various types of filament are being conducted, and 3D printer designs, software and 3D printing processes are being intensively improved. According to the international consulting company DELOVOY PROFIL, the annual growth rate of the global market of additive technologies is 19.3%, including FDM technologies, which are the most common today [1]. This technology has many unconditional advantages, but it also has its drawbacks [2].

Layered overlay printing (FDM) is an additive manufacturing process that is implemented using a 3D model in the form of tracks of molten polymer materials that sinter together to create a finished product. FDM products are usually printed without solid filling to reduce printing time and save material. Obtaining the necessary contours of the product layer, their internal filling and ensuring the necessary properties of the product are one of the main tasks when printing on FDM printing technology. Considerable attention is paid to the choice of the optimal technological mode of printing, shrinkage processes during printing, the use of various additional elements [3] and modification of polymers.

In the construction of low-rise buildings, with the help of 3D printing, it is possible to implement almost any ideas, to achieve the best architectural expressiveness of objects [4].

In the modern restoration of architectural heritage, FDM technology is also increasingly used, namely for:

- creation of identical ornaments [5];
- restoration of the lost part of the product [6];
- acceleration of the restoration process [7].

There are printers that are designed only for reproduction of unique objects of historical value [8].

In this regard, there is a rejection of generally accepted concepts in the field of construction, and a focus on additive construction technologies [9].

At the same time, the capabilities of equipment and materials are rapidly evolving towards increasing printing speed with higher print quality and distribution capacity, as well as reducing production costs [10, 11]. Thus, the use of FDM technologies will confidently take its leading place when printing a wide variety of construction products.

The aim of the work is to study the changes in the properties of the material for 3D printing under difficult operating conditions.

Research materials and methodology. The following plastics were the main materials used in the evaluation of products printed using 3D printing.

ABS (acrylonitrile butadiene styrene). The most popular material in 3D printing. It is quite elastic, odorless, and can withstand temperatures up to 100°C. It is supplied in the form of skeins of thread with a diameter of up to 3 mm. The melting point of plastic is 220-260°C. The only significant drawback is vulnerability to direct sunlight.

PLA (polylactide). The main competitor is ABS with a melting point of 190°C. Eco-friendly.

In addition, PLA plastic decomposes into safe materials over time, which is both a plus and a minus. Less strong than ABS, it loses its properties already at a temperature of 80°C. It is most often used for printing construction products.

PETG (polyethylene glycol terephthalate). This is a classic PET plastic to which glycol is added. Thanks to this, brittleness is eliminated, durability and tensile strength are increased. The material is stronger than ABS or PLA, and at the same time less brittle. It also has minimal shrinkage.

NYLON. Crystallized hard plastic with high tensile strength and wear resistance. Nylon has a high softening temperature and elasticity at low temperatures, withstands sterilization with steam heated to 140°C. This allows you to use it in conditions with temperature differences in a wide range.

To carry out a comparative analysis of the properties of plastic, the same control samples were printed from filling the product with plastic – 50%. Experiments were conducted with various samples of materials under difficult operating conditions, the results of which are listed in the Table 1. The purpose of the analysis was to study changes in material properties under difficult operating conditions.

The properties were evaluated according to eight parameters: tensile strength and load, frost resistance, heat resistance, wear, shrinkage, boiling, exposure to open fire.

Research results. FDM technology allows you to print products on a 3D printer using a wide range of polymer materials with different physical and chemical characteristics and properties. This is the most widespread method of 3D printing in the world, on the basis of which millions of 3D printers work – from the cheapest to industrial 3D printing systems, as it allows for quick and inexpensive printing of various parts during small-scale production [11].

Various polymer materials are used to manufacture products using three-dimensional printing technology (polymer in the form of a thread or rod – filament). At the same time, the filament is fed into the extruder – a device equipped with a mechanical drive for feeding, a heating element for melting the material and a nozzle through which the material is extruded. The extruder contains a thermal barrier with a cooling radiator to ensure the phase transition of plastic from a solid to a liquid phase. In addition, the upper part of the nozzle is connected through a thermal barrier to the feed drive, cooled by a fan to create a sharp temperature gradient necessary to ensure a smooth supply of material. The extruder moves in the horizontal and vertical planes under the control of the microprocessor control board. The nozzle moves along the path specified by the automated design system. The model is built layer by layer, from the bottom up. As a rule, the extruder (also called the "print head") is driven by stepper motors. The most popular coordinate system used by FDM is rectangular, with X, Y, and Z axes.

In this process, there are many factors that affect the quality and accuracy of the product. Obviously, the accuracy of printing a product is determined by the accuracy of a specific 3D printer. However, there are other factors that affect the properties of material printed with a 3D printer. The most common printing problems are poor adhesion of the plastic to the 3D printer table, not enough or too much plastic being extruded, holes or gaps in the top layer of the printout, hairs or webbing, overheating of the plastic, layer misalignment or misalignment, layers separating, and many others are also split.

So, for example, the strength of the material also depends on the modes of FDM printing. The speed of movement of the extruder nozzle together with the thickness of the applied layer affect the adhesion strength of the threads. This is due to the spread of heat from the extruder nozzle to the material [12]. At a high print speed, less heat is transferred at any point of the filament than at a low speed. If you print a small layer at a low speed, the heat dissipation can be very large. This will increase adhesion, but there will be a possibility of defects in the form of plastic overflows. When printing products with a greater layer thickness at high speed, poor adhesion between the layers of plastic may occur due to insufficient heat in the extruder. From here, the problem arises – how to determine the optimal temperature and speed modes of operation of the printer.

The filament, having a low thermal conductivity, does not melt instantly, which requires the presence of a sufficient volume of the heater channel (nozzle) to ensure a continuous supply of material at high printing speeds. In addition, due to the excess pressure of the molten filament in the heater channel, it is impossible to immediately stop the discharge of material from the nozzle.

Which leads to uncontrolled fluidity of the material and deterioration of the appearance of the product.

When the filament is fed quickly, the passage of the short channel takes place in a short period of time, and before it has time to melt, the filament gets stuck in the nozzle. A short melting zone automatically means a low speed. This is acceptable for printing small objects, but starting with a mass of 200 grams, a higher speed is required. Raising the temperature to increase the speed leads to the degradation of the plastic in the finished product.

Three parameters are responsible for the maximum FDM printing speed:

- technical characteristics of the printer, i.e. how fast the print head can move is mainly determined by the design features of the printer and the weight of the moving parts;
- extruder performance – whether the extruder is able to melt enough plastic to provide the required width and height of the layer at a given print speed;
- maximum nozzle capacity – the amount of plastic that can be passed through without clogging the extruder.

The maximum productivity of the nozzle is the main factor influencing the overall productivity of the entire extruder, which affects the maximum printing speed of the layer. The standard E3D V6 extruder melts less plastic than the E3D Volcano extruder. But, as a rule, there are no problems in this case, because on standard nozzles with a diameter of 0.2 to 0.6 mm, the main reason for limiting the maximum printing speed is the productivity of the nozzle. A linear extrusion speed of mm/s is often used when calculating the productivity of the printer. This seems logical – the faster the melt is squeezed, the faster the head can move. To measure the speed, for example, the filament is squeezed into the atmosphere, the length is measured, and the printing speed is calculated. However, this method does not give an accurate idea of the printer's performance. Under certain conditions, the thread expands when leaving the nozzle due to the high viscosity of the melt. This greatly distorts the actual diameter of the thread. In some printers at very high speeds, the diameter of the thread can be three times the diameter of the nozzle from which it was squeezed. Also, the filament thread can stretch under its own weight if it has been squeezed out hot enough. It can also be glued, bent or extruded on the desktop with some smearing, although this is necessary for a good connection of filament threads in a monolithic product. In this case, the productivity W mm³/s is calculated by formula (1), multiplying the speed of movement of the head by the width of the extruded thread and the height of the layer. The exact calculation in this case is quite problematic, because the edges of the wall have a curved shape [7].

$$W = V \cdot A \cdot H, \quad (1)$$

where V – the speed of movement of the head, mm/s;

A – width of the extruded thread, mm;

H – height of the layer (head height above the table), mm.

Obviously, the most accurate and unambiguous will be the expression of the extrusion rate in mm/s or mg/s. Because plastic has a different specific gravity (for example, the specific gravity of polyamide 1140 kg/m³ and ABS 1050 kg/m³), it is better to use mm³/s (cm³/s) to assess the performance of the printer. However, it is still necessary to indicate with which nozzle this result was achieved. With equal nozzle performance, significant differences in linear velocity values can be obtained by weight and volume of extruded molten plastic.

For example, if the printer has an extrusion speed of 100 mm/s, there will be significant differences in performance with different nozzle diameters. The calculation of printer performance is clearly seen from formula (2):

$$V = (L \pi D^2/4) / \rho, \quad (2)$$

where ρ is the filling density of the product.

The formula shows that with increasing the diameter of the printer nozzle twice, at the same extrusion speed, the print speed will quadruple.

Another factor that affects the properties of the printed product is the diameter (or width) of the extruded filament. The melt is extruded in the form of a cylinder from the nozzle of the head,

but to fasten the layers together, the height of the head above the product is taken slightly less than the diameter of the nozzle. The filament is slightly smeared and expanded. In practice, the thickness of the layer is chosen 1.5-2 times smaller than the diameter of the nozzle.

One of the problems is the low resolution and accuracy of printing, and the more accurate the print (smaller the diameter of the nozzle), the lower the print speed. Several factors affect print resolution and accuracy. Namely, uneven walls and shrinkage of plastic after printing and deformation during printing, which significantly complicates the exact size and as a result of warping large parts, and most importantly – the diameter of the nozzle determines the size of the smallest details to be printed.

However, the most significant factor that affects the properties of the product, of course, is the material and quality of the filament [8]. To conduct a comparative analysis of the properties of plastic, experiments were conducted with different samples of the most popular materials. The purpose of the analysis was to study changes in the properties of the material in difficult operating conditions. The main characteristics of the most used materials are given in Table 1.

Table 1 – The main characteristics of materials for 3D printing

Type of plastic	Indicators				
	t °, s softening / operation	Strength on the break MPa	Strength for bending MPa	Printing accuracy %	Density, kg/m ³
ABS	100/ -40 +80	22	41	1	1050
PLA	50/ -20 +40	57.8	55.3	0.1	1230
PETG	80/ -40 +70	36.5	76.1	0.1	1270
NYLON	120 -30 +120	83	70	3	1140

Evaluation of the properties of materials was performed according to the following parameters:

1. Tensile strength (kg). A filament with a diameter of 1.75 mm was taken from the corresponding 4 materials and the tensile strength was checked with the help of a dynamometer.
2. Load strength (kg). A single load of 1500 kg was applied on samples of cubic products (with a side of 30 mm).
3. Frost resistance (C°). Strips of products were placed in a freezer with a temperature of -20 ° C. Then, after 5 minutes, their flexibility was tested.
4. Heat resistance (C°). Samples of materials in the form of strips were placed in a furnace with a gradual increase in temperature, in the process the strips were deformed depending on the material of execution, at certain temperatures.
5. Wear (mm). The wheels of the respective products were placed on the axle and rotated on a coarse abrasive belt at a speed of 20 m/s, each of the wheels overcame a distance of 5500 m. After that, measurements of the diameter of the products were made.
6. Shrinkage (mm). After production with a 3D printer, wheels with an initial diameter of 25 mm were cooled and diameter reduction measurements were performed.
7. Boiling. The products were boiled in water for 10 minutes. After that the samples of products were compared with similar samples that were not subjected to heat treatment.
8. Influence of open fire. The nozzle of a construction hair dryer with a temperature of 420 ° C was sent to the products for some time.

The test results of the respective materials are presented in Table. 2.

Table 2 – Impact of tests on materials

Type of plastic	Experiments							
	Tensile strength (kPa)	Load capacity (1500 kg)	Frost resistance	Heat resistance (C°)	Wear (MM)	Shrinkage (initial size 25 mm)	Boiling	Influence of open fire
ABS	608	unchanged	lost flexibility	1115	0.19	24.73	size increase, color change	ignition occurred
PLA	784	unchanged	unchanged	661	0.12	24.55	size increase	no ignition occurred
PETG	686	unchanged	unchanged	776	destroyed	24.8	structure completely destroyed	no ignition occurred
NYLON	666	unchanged	unchanged	1145	0.08	24.59	unchanged	no ignition occurred

Analysis of the results shows that there is no absolutely ideal material for 3D printing. Each material has both negative and positive characteristics. The choice of material for printing the product will depend on the purpose of the product and its operating conditions. It is necessary to develop a technique for selecting composite material for printing depending on the requirements of the technical task. This will resolve the contradiction in the choice of material used for printing construction products. This is because the choice of filament is limited by the technical characteristics specified in the passports of the installations, the requirements for the product and the required quality of the resulting product. Moreover, one type of filament from the same producer, but of different grades or lots, can differ significantly in physical and mechanical properties. The development of such a technique is our direction of further research.

Inside the product, the 3D printer prints a stiffening grid that distributes the load on the structure of the detail. The filling of the product can vary from 0% to 100%, depending on the technical conditions and the nature of the product. Partial filling of the structure allows you to significantly reduce the price of the product and printing time. This factor has a very significant effect on the strength and weight of the product. The strength of the entire structure decreases when the structure of the product is partially filled. However, to increase the strength is possible by increasing the wall thickness of the product. By increasing the wall thickness, for example up to 1.2 mm, it is possible to increase the overall strength of the product.

Conclusions. The mastering of additive technologies will entail the adjustment of construction product design principles, the development of printing technologies, the study and use of new and promising materials, and the emergence of technologies related to 3D printing. The research provided an opportunity to analyze the factors that affect the properties of a printed product using a 3D printer. As a result of the study, it was found that the main factors are: the percentage of internal filling and the thickness of the wall of the product. However, the conducted research does not exhaust the entire raised problem, and therefore the study of the factors that affect the properties of the printed building product remains relevant and requires further research.

References

- [1] A. A.V. Chabanenko, E.G. Semenova, V.O. Smirnova, A.O. Smirnov, N.N. Rozhkov, "Obespechenie kachestva additivnogo proizvodstva posredstvom sistemyi kontrolya posloynogo sinteza", *Voprosyi radioelektroniki*, no.10, pp. 75-79, 2018.
- [2] M. Spoerk, C. Holzer, J. Gonzalez-Gutierrez, "Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 137, no. 12, pp. 48545, 2020.
- [3] S.V. Kondrashov, A.A. Pyihtin, S.A. Larionov, A.E. Sorokin, "Vliyanie tehnologicheskikh rezhimov FDM-pechati i sostava ispolzuemyih materialov na fiziko-mehaniicheskie harakteristiki FDM-modeley (obzor)", *Trudyi VIAM*, no. 10 (82), 2019. [Online]. Available: <http://www.viam-works.ru>. Accessed on: June 01, 2021. DOI: 10.18577//2307-6046-2019-0-10-34-49.
- [4] Primenenie 3D pečati v stroitel'stve i perspektivy ee razvitiya. [Online]. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-3d-pechati-v-stroitelstve-iperspektivy-ee-razvitiya>. Accessed on: June 19, 2022.
- [5] Additivnye tekhnologii v stroitel'stve. [Online]. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnye-tehnologii-v-stroitelstve>. Accessed on: June 19, 2022.
- [6] N.I. Vatin, L.I. CHumadova, I.S. Goncharov, V.V. Zykova, A.N. Karpenya, A.A. Kim, E.A. Finashenkov, "3D-pechat' v stroitel'stve", *Stroitel'stvounikal'nyh zdaniy i sooruzhenij*, no. 1(52), pp. 27-46, 2017.
- [7] N.V. Savickij, S.V. SHatov, O.A. Ozhishchenko, "3D-pechat' stroitel'nyh ob'ektov", *Vestnik Pridneprovskoj gosudarstvennoj akademii stroitel'stva i arhitektury*, no. 3 (216), pp. 18–26, 2016.
- [8] F. Bos et al., "Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing", *Virtual and Physical Prototyping*, T.11, no.3, pp. 209-225, 2016.
- [9] Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, "MingJen Tan Anisotropic mechanical performance of 3Dprinted fiber reinforced sustainable construction material", *Materials Letter*, vol. 209, pp.146–149, 2017.
- [10] E.N. Kablov, "New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing", *Herald of the Russian Academy of Sciences*, vol. 90, no.2, pp. 225-228, 2020.
- [11] X. Zhang, W. Fan, T. Liv, "Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its application", *Composites Communications*, vol. 21, pp. 100413, 2020.
- [12] X. Peng, M. Zhang, Z. Guo, et al., "Investigation of processing parameters on tensile performance for FDM-printed carbon fiber reinforced polyamide 6 composites", *Composites Communication*, vol. 22, pp.100478, 2020.
- [13] M. Bertolino, D. Battezzore, R. Arrigo et al., "Designing 3D printable polypropylene: Material and process optimization through reology", *Additive Manufacturing*, vol. 40, pp. 101944, 2021.
- [14] G. Spiegel, C. Paulik, "Polypropylene Copolymers Designed for Fused Filament Fabrication 3D-Printing", *Macromolecular Reaction Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 1900044, 2020.

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ВЛАСТИВОСТІ НАДРУКОВАНОГО ВИРОБУ ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-ПРИНТЕРА

¹Хлицов М.В., к.т.н., доцент,
color-t@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3486-6833

¹Бачинський В.В., к.т.н., с.н.с.,
slawa_dk@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2187-8616

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

²Шкурпіт О.М., ад'юнкт,
pochta151279@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2010-8057

²Кондратенко О.І.,
kondrate88@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8192-8529

²Військова академія
вул. Фонтанська дорога, 10, м. Одеса, 65009, Україна

Анотація. У статті наведено аналіз застосування матеріалів для виробництва будівельних виробів розроблених з використанням адитивних технологій. Зазначені в статті зразки матеріалів мають стати найбільш поширеними під час виробництва будівельних споруджень. Визначені також основні фактори, які впливають на властивості надрукованого матеріалу за допомогою 3D-принтера.

На сьогоднішній день виробництво матеріалів для виготовлення різних будівельних споруджень швидко розвивається, стає більш технологічним, збільшуються обсяги виготовлення, підвищується точність та якість виготовлення деталей, при зниженні витрат. Використання 3D-принтера дозволяє вдало проводити оптимізацію виробництва будівельних споруджень. У випадку звичайного способу виробництва їх вартість і складність досить висока. Впровадження 3D-принтера дає змогу суттєво покращити дизайн та структуру виробів за допомогою удосконалення технології та витрат матеріалів.

Проведені дослідження відкрили цілий пласт питань та проблем, пов'язаних із необхідністю вдосконалення процесу 3D друку, організації та управління друку складних будівельних виробів, які б дозволили ефективно використовувати новітні адитивні технології 3D-друку в сучасному будівництві.

Експериментально встановлені властивості основних матеріалів для 3D друку, які використовуються при FDM технології отримання виробу. Визначений порядок розрахунку продуктивності екструдера та основні проблеми під час друку.

Дослідження показали, що використання адитивних технологій у виробництві будівельних виробів вже на сучасному етапі надасть можливість об'єднати новітні наукові розробки в галузях техніки, технології, матеріалознавства, архітектури, дизайну для коригування принципів конструювання, відпрацювання технологій друку, використання нових стратегій побудови сучасних будівель, появи нових, суміжних з 3D-друком технологій.

Ключові слова: адитивні технології, 3D друк, філамент, структура, екструдер.

Стаття надійшла до редакції 12.07.2022

ЗАХИСТ МОРСЬКИХ КАНАЛІВ ВІД НАНОСІВ

Рогачко С.І., д.т.н., професор,
rostasice@ukr.net, ORCID:0000-0001-5201-5368
Одеський національний морський університет
вул. Мечнікова 34б, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. Захист морських каналів від донних наносів є актуальною технічною задачею для багатьох портів світу, особливо для тих, які знаходяться в мілководних заливах та лиманах. В штормові періоди вітрові хвилі на акваторії морів, які зароджуються на глибокій воді, підходячи до берегів, пересікають мілководні та прибіжні зони. При цьому відбувається їх рефракція і трансформація. Рух частинок води в хвилях в мілководній зоні по еліптичним орбітам не затухає з глибиною води. Біля самого дна проекції вертикальної складової швидкості орбітального еліпсоїдного руху дорівнюють 0 і частинки води в хвилі здійснюють знакозмінний рух вздовж поверхні дна, який залежить від фаз проходження гребенів та впадин. Асиметрія профілів вітрових хвиль при малих глибинах води збільшується в міру їх приближення до берегів. Енергія вітрових хвиль є основною причиною міграції донних наносів. Напрямок руху наносів залежить від напрямку штормових вітрів, які мають змінний характер, відповідний розі вітрів того чи іншого регіону. На інтенсивність їх переміщення також впливають і морські течії. При проектуванні морських каналів, у тому числі і підхідних, основною задачею проєктантів є збільшення міжремонтних термінів днопоглиблювальних робіт для підтримки оголошених глибин в процесі їх експлуатації. В більшості випадків, коли акваторії портів що проєктуються, будуть розташовані в лиманах, також передбачається проєктування і будівництво загороджувальних споруд для захисту морських частин підхідних каналів від донних наносів. Такі типи гідротехнічних споруд важко будувати в умовах відкритого моря, а їх вартість прирівнюється до вартості огороджувальних споруд. В цій роботі розроблено відносно простий спосіб захисту морських каналів, у тому числі і підхідних, від наносів для збільшення термінів міжремонтних днопоглиблювальних робіт без будівництва дорогих загороджувальних споруд.

Ключові слова: морські канали, вітрові хвилі, донні наноси, загороджувальні споруди, днопоглиблювальні роботи.

Вступ. Морські порти світу, які розташовані в лиманах, мілководних заливах та затоках, з'єднуються з морем підхідними каналами. Пересікаючи малі глибини води (мілководні та прибіжні зони), вони зазнаються інтенсивного занесення донними наносами. Це призводить до зменшення глибин води в каналах в часі та до зменшення термінів між ремонтними днопоглиблювальними роботами. Інтенсивність занесення залежить від цілого ряду природних факторів: топографії морського дна; тривалості та жорсткості штормів; швидкості течій; типів донних ґрунтів та їх фізико-механічних характеристик. Крім цього, на цей процес впливає проєктний профіль каналів та їх планове положення по відношенню до воріт портів та прилеглим берегам. В процесі інженерних вишукувань і наукового супроводу проєктування морських каналів встановлюється загальний об'єм потоків наносів та генеральний напрямок їх транзиту, розглядаються різні варіанти планового положення трас каналів, кутів укосів, а також варіанти захисту каналів від занесення з урахуванням перелічених вище факторів та проєктних глибин. На основі аналізу всіх факторів, а також результатів фізичного та математичного моделювання, вирішується питання про оптимальні, для конкретних регіонів планові розташування морських каналів, що проєктуються, а також їх габаритів та планів трас. При цьому беруться до уваги габарити розрахункових суден, типи каналів та вантажообіг портів, зокрема з урахуванням найближчих перспектив. До основних вимог, що пред'являються до морських каналів при їх проєктуванні, є безпека плавання суден, мінімальні обсяги

днопоглиблювальних робіт, як під час їх будівництва, так і в процесі експлуатації. З цієї причини захист морських каналів від занесення донними наносами і в даний час є вельми актуальною технічною задачею. Дана задача вирішена на підставі аналізу існуючих методів боротьби із занесенням морських каналів донними наносами в мілководних зонах морів, механізму руху наносів та розробкою найпростішого способу захисту каналів.

Аналіз способів захисту морських каналів від занесення. Як відомо, основною рушійною силою транзиту наносів є горизонтальні складові проекції орбітальних швидкостей частинок води у хвилях. У мілководних та прибіжних зонах ці частинки рухаються еліпсоїдальними траєкторіями по всій глибині води. Їх значення, залежно від параметрів хвиль і глибин води, описані відповідними рівняннями, різних хвильових теорій [1-6]. Безпосередньо біля дна проекції вертикальних складових орбітальних швидкостей рівні з нульовим значенням, тому, завдяки проекціям горизонтальних складових швидкостей, частки води за період хвилі здійснюють знакозмінні рухи над поверхнею дна. Асиметрія профілів хвиль призводить до того, що донні швидкості при проходженні гребенів хвиль завжди більші, ніж при проходженні впадин. Це і є основною причиною переміщення донних наносів у тому чи іншому напрямку під впливом вітрових хвиль. Слід відзначити, що переміщення донних наносів відбувається також і під впливом течій.

Боротьба із занесенням морських каналів нині здійснюється різними способами. Один із них передбачає будівництво дорогих загороджувальних споруд, що зупиняють рух донних наносів. Такі споруди можуть перетинати вільну поверхню води, або повністю бути під нею [7]. Найбільш простими, у конструктивному відношенні, є кам'яні начерки та шпори у вигляді дворядних шпунтових стінок. У деяких випадках їх доцільно проектувати та будувати комбінованими (рис. 1 а, б).

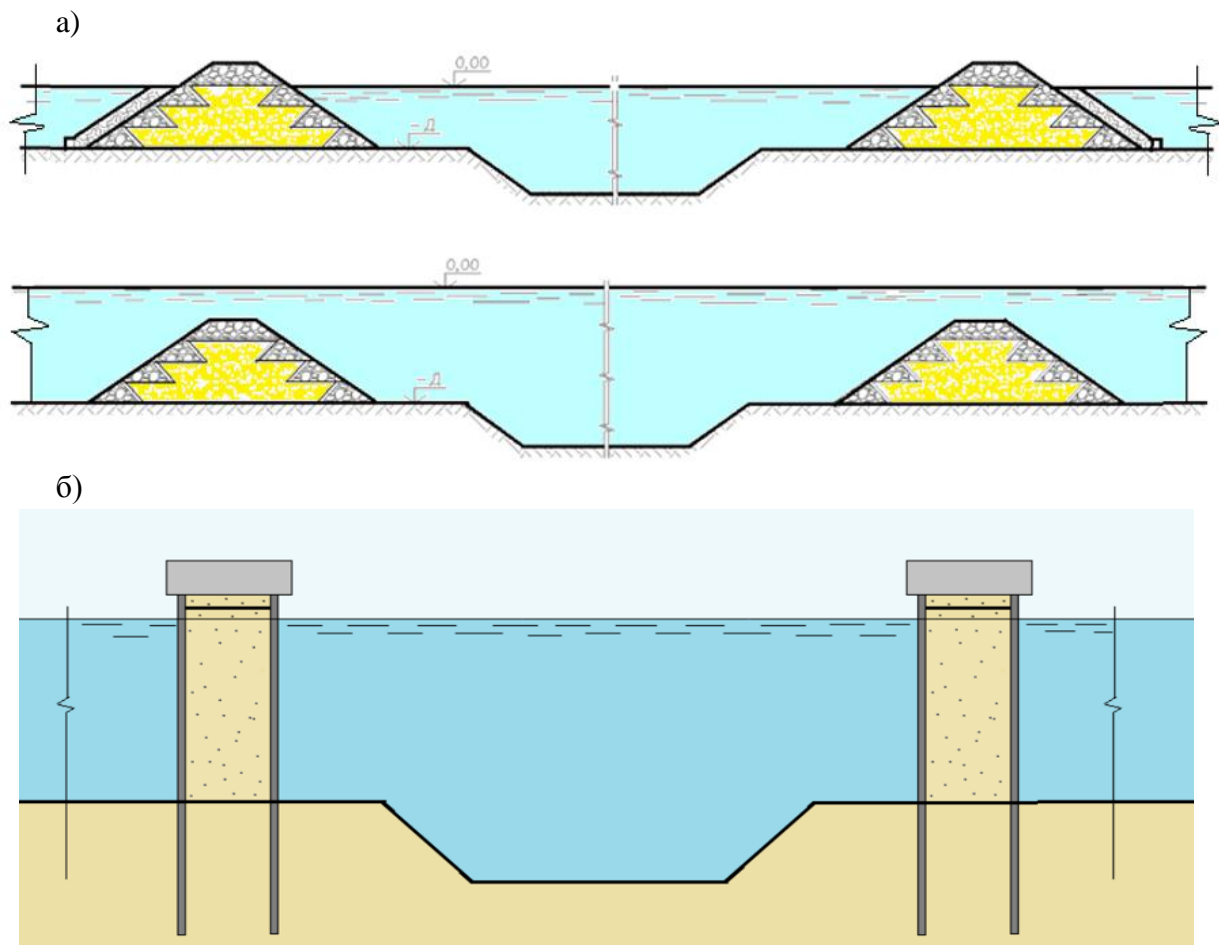


Рис.1. Схеми загороджувальних споруд морських каналів:
а – кам'яні начерки; б – дворядна шпунтова стінка (шпора)

Такі споруди надійно перехоплюють потоки наносів з обох боків каналів. При яскраво вираженому односторонньому напрямку руху наносів у кореневих частин таких споруд згодом відбувається інтенсивне наповнення кута між лінією берега та загороджувальною спорудою. З іншого боку каналу утворюється дефіцит наносів, що призводить до руйнування берегів, що прилягають до іншого боку підхідних каналів. Головні частини огороджувальних споруд необхідно продовжувати до таких глибин, де транзит наносів, з урахуванням їх фізико-механічних характеристик, неможливий для даного конкретного місця. Будівництво загороджувальних споруд завжди здійснюється в умовах відкритого моря, тому темпи їхнього спорудження істотно залежать від погодних умов. Вартість таких споруд сумірна з вартістю огороджувальних споруд (молів), що перетинають мілководні, прибіжні та при урізні зони. Для безпечного плавання суден такі споруди мають бути позначені відповідними навігаційними знаками.

При виконанні днопоглиблювальних робіт загороджувальні споруди становлять певні труднощі в роботі суден технічного флоту. Як свідчить практика експлуатації таких споруд, виконання ремонтних днопоглиблювальних робіт, по трасам каналів ускладнює безпечне плавання суден, що входять і виходять, і несприятливо впливає на продуктивність роботи портів.

Інший спосіб боротьби з занесенням морських каналів донними наносами полягає у влаштуванні пасток у вигляді прорізів у морському дні, розташованих паралельно каналам, які поступово заповнюються наносами, сприяючи збереженню оголошених глибин води на каналах досить тривалий час [7]. Геометричні розміри прорізів залежать від об'єму вздовж берегових потоків наносів, які мігрують в тому чи іншому конкретному місці трас каналів, що проектується. До переваг такого способу відносяться простота виконання відносно дешевих прорізів з урахуванням початкових глибин води вздовж трас морських каналів. Прорізи можуть також влаштовуватись тільки вздовж одного боку каналу в тих випадках коли потік наносів має незмінний односторонній напрямок. Схема розташування пасток вздовж морських каналів приведена на рис. 2.

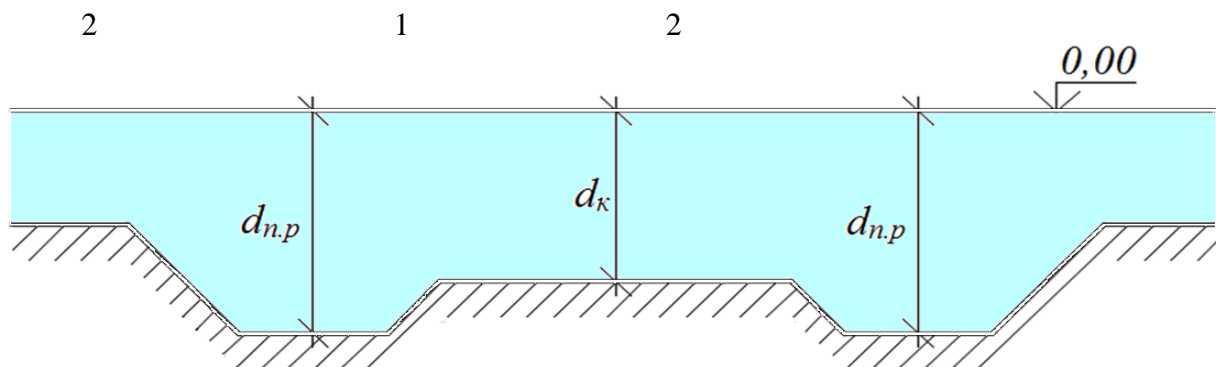


Рис. 2. Приклади схеми розташування прорізів-пасток паралельних трасам морських каналів:
1 – канал; 2 – прорізи

Слід відзначити, що виконання ремонтних днопоглиблювальних робіт з очищення пасток від наносів не ускладнює судноплавство на морських каналах. Проте даний спосіб захисту не є доцільним при захисті морських ділянок підхідних каналів, оскільки при його використанні буде відбуватися інтенсивне руйнування безпосередньо прилеглого до прорізів узбережжя.

Мета та завдання дослідження. Метою цієї роботи є розробка найпростішого, в конструктивному відношенні, та недорогого способу захисту морських каналів від занесення донними наносами, в тому числі ділянок підхідних каналів, що перетинають мілководдя при розташуванні акваторій морських портів в лиманах та затоках. Поставлена мета була досягнута вирішенням наступних завдань:

- аналізом існуючих способів боротьби з занесенням наносами морських каналів;

- аналізом існуючих способів захисту від наносів підхідних каналів морських портів, розташованих в мілководних лиманах;
- аналізом механізму руху наносів уздовж морських берегів;
- розробкою простого способу захисту морських каналів, в тому числі і підхідних, від занесення донними наносами.

Матеріали та методи досліджень. Основною причиною переміщення донних наносів є енергія вітрових хвиль. На глибокій воді, при відношенні глибини води d до довжини хвилі λ ($d/\lambda > 0,5$), рух частинок води в хвилях відбувається по круговим орбітам і повністю затухає в глибині, не досягнувши донної поверхні. Але навіть в мілководній зоні профілю вітрових хвиль властива асиметрія. При цьому гребені хвиль завжди більші ніж впадини. По мірі приближення до берегів в мілководних та прибіжних зонах гребені хвиль значно перевищують впадини, а рух частинок води по всій товщі води здійснюється по еліптичним орбітам (рис. 3). Асиметрія вітрових хвиль призводить до асиметрії проекцій швидкостей частинок води в хвилях. Біля самого дна значення проекцій швидкостей частинок води в хвилях на вертикальну вісь V_y прагнуть до 0. А проекції швидкостей частинок води на горизонтальну вісь V_x під гребенями та впадинами біля донної поверхні не рівні між собою, при цьому завжди $V_{x,гр.} > V_{x,вп.}$, що і є асиметрією донних швидкостей S , яка кількісно визначається формулою:

$$S = V_{x,гр.} / V_{x,вп.} \quad (1)$$

Асиметрія донних швидкостей S є основним фактором переміщення донних наносів в мілководних та прибіжних зонах морів в періоди їх штормової діяльності [8]. Величини донних швидкостей можуть обчислюватися відповідно до різних хвильових теорій. Крім цього на процес переміщення донних наносів впливають і прибережні течії, які виникають в прибіжних зонах та в зонах між останнім руйнуванням хвиль і урізом води в штормові періоди [3].

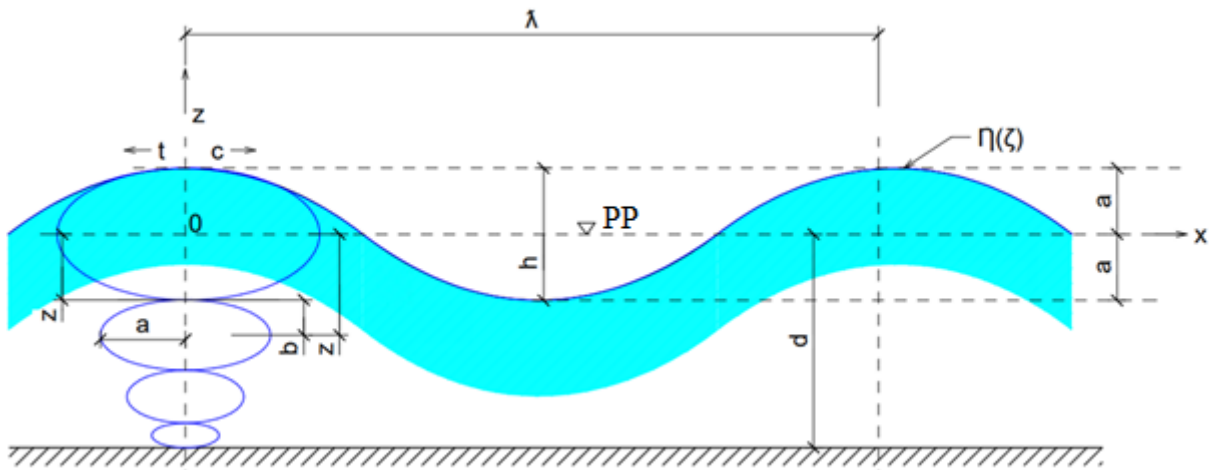


Рис. 3. Характер руху часток води в хвилях на мілководді:

a – амплітуда; x та z – горизонтальна і вертикальна координати; a та b – піввісі еліптичних орбіт; h – висота хвилі; λ – довжина хвилі; d – глибина води; t – час; PP – розрахунковий рівень води

Цей процес найбільш точно описується кноїдальною теорією хвиль [6]. Відповідно нелінійній теорії хвиль, проекція горизонтальної складової швидкості часток води в хвилі визначається із наступного рівняння:

$$V_x = (g/d)^{1/2} \times \dot{\eta}, \quad (2)$$

де: g – прискорення вільного падіння m/c^2 ; d – глибина води m ; $\dot{\eta}$ – рівняння періодичної кноїдальної хвилі (відхилення хвильової поверхні від рівня спокійної поверхні води в точці з координатою x в момент часу t):

$$\dot{\eta} = \dot{\eta}_{\min} + hc n^2 (kx - \omega t, m), \quad (3)$$

де: $\dot{\eta}_{\min}$ – відхилення відповідне підосві хвилі; h – висота хвилі; cn – еліптична функція Якобі з модулем m ($0 \leq m \leq 1$).

Модуль m пов'язаний з висотою хвилі h , довжиною λ та глибиною води d співвідношенням:

$$mK^2 = 3/16 \times d\lambda^2/h^3, \quad (4)$$

де: K – повний еліптичний інтеграл, залежний від m .

Хвильове число k , кругова частота ω пов'язані з довжиною хвилі λ та її періодом T наступними співвідношеннями:

$$k = (2K)/\lambda, \quad (5)$$

$$\omega = (2K)/T. \quad (6)$$

Розрізняють поздовжнє та поперечне, по відношенню до берегів, переміщення наносів. Фронтальний підхід штормових хвиль, попри їх рефракцію є майже винятком, оскільки хвилі завжди підходять до берегів під деяким кутом. Виходячи з цього, найбільш небезпечним, з точки зору занесення морських каналів, є поздовжнє переміщення наносів у мілководних, прибіжних та при урізних зонах морів. Розміри цих зон на одному і тому самому місці узбережжя залежать виключно від параметрів хвиль, жорсткості та тривалості штормів.

Результати досліджень. Виходячи із аналізу механізму переміщення потоків наносів вздовж морських берегів, описаного багатьма дослідниками [3, 4, 8], інтенсивність цього процесу залежить від донних хвильових швидкостей і вздовж берегових течій, а також від фізико-механічних характеристик поверхневих шарів ґрунтів. Відомим є той факт, що наявність прорізів в морському дні або на каналах у мілководних прибережних зонах впливає на картину розповсюдження вітрових хвиль та їх параметри [9, 10]. Ступінь цього впливу залежить від довжини хвиль та напрямку їх фронтів розповсюдження відносно поздовжніх осей каналів або прорізів. Таке явище спостерігалось як в лабораторних умовах на фізичних моделях, так і в натурі при проходженні фронтів хвиль від різних румбів по відношенню до планового положення морських каналів або інших донних виїмок ґрунтів. При цьому на параметри хвиль, що рухаються до берегів в мілководних зонах, впливають рефракція, дифракція, інтерференція, дисипація хвильової енергії та тертя об донну поверхню. Фахівці відрізняють декілька схем проходження вітрових хвиль через канали [10]:

- вісь каналу паралельна напрямку хвильового фронту;
- вісь каналу перпендикулярна напрямку хвильового фронту;
- хвилі проходять під різними кутами до поздовжньої вісі каналів (рис. 4).

В першому випадку відбувається рефракція та інтерференція хвиль. Висота хвиль в таких випадках зменшується приблизно на 40% по причині різкого збільшення глибини води. Напрямок хвильового фронту заломлюється на брівках каналів. На брівках каналів хвильова енергія зростає, а по осям каналів суттєво зменшується. В другому випадку хвилі, при проходженні через канали, зменшуються по висоті. В третьому випадку, за твердженням авторів роботи [10], критичним є кут між променями хвиль і осями каналів рівний 25° . Якщо цей кут буде більше цієї величини, хвилі пройдуть через канал зі зменшенням своїх параметрів, а якщо менше, то вони будуть відбиватися. При цьому їх висоти на вході в канали також будуть зменшуватись. Зі зменшенням цього кута хвилі після заломлення залишаються на навітряному боці каналу, продовжуючи свій рух по навітряній бровці зі збільшенням хвильової енергії і відповідним зростанням їх висот. В той же час на підвітряній бровці каналів хвильова енергія зменшується з відповідним зменшенням висот хвиль. Це явище обов'язково необхідно брати до уваги під час проектування морських каналів, в тому числі і підхідних.

Такі процеси неодноразово спостерігались в експериментальних дослідженнях захищеності акваторій портів, що проектувались із занесенням підхідних каналів, які пересікали мілководдя в лабораторних умовах, що проводив автор при науковому супроводі низки реальних проектів. Паралельні морським каналам прорізи-пастки функціонують згідно з наведеними схемами в залежності від кутів підходу хвильових фронтів. Їх використання

найбільш ефективно в тих випадках, коли траси морських каналів проходять через лимани та затоки.

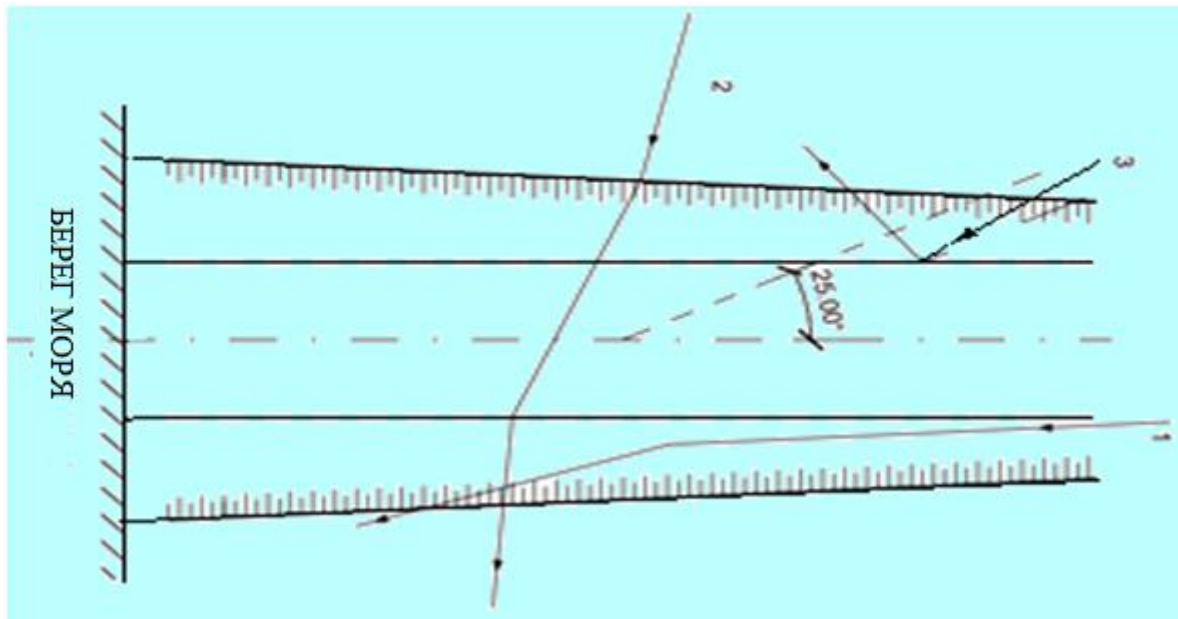


Рис. 4. Схеми проходження вітрових хвиль через морські канали [10]:
1, 2, 3 – напрямки хвильових фронтів по відношенню до осі симетрії каналу

Переміщення донних наносів в морські канали можливо суттєво знизити за допомогою відповідного зменшення донних швидкостей в хвилях безпосередньо перед брівками. Для цього на шляху руху морських хвиль, які будуть рухатись до каналів, необхідно розмістити штучні перешкоди у вигляді гнучких полотниць із синтетичних матеріалів з позитивною плавучістю. Вони призначені для часткового руйнування структури вітрових хвиль, що призведе до суттєвого зниження величин проекцій горизонтальних складових швидкостей частинок води біля дна безпосередньо перед брівками каналів. Такі полотнища слід обладнувати додатковими поплавками, які сприятимуть їх поверненню в вертикальне положення після проходження гребенів та впадин хвиль аналогічно, запатентованому в Україні, гнучкому хвилелому [11]. Поплавки полотниць також будуть утримувати кріпильні канати в постійному натягу. Планове положення полотниць повинно забезпечувати поступове зменшення орбітальних швидкостей часток води в хвилях з поверхні води і до самого дна. З урахуванням обставин, що до розрахункових параметрів хвиль в системі розрахункового шторму, згідно рекомендаціям норм [12], відносяться висота хвилі $h_{1\%}$ забезпеченості та середня довжина хвилі λ , то розміщати полотнища слід на брівках підхідних каналів в межах половини середньої довжини розрахункової хвилі (рис. 5).

Розміщати полотнища з позитивною плавучістю з нетканих матеріалів слід вдовж обох брівок морських каналів при рівно ймовірному підході вітрових хвиль по відношенню до планового положення їх осей. У випадках одностороннього напрямку руху наносів розміщення полотниць доцільно влаштовувати тільки на одній брівці з навітряного боку. Відстані між полотнищами залежать від середньої довжини хвилі в системі розрахункового шторму. Так загальна ширина зони розміщення полотниць на брівках каналів не повинна перевищувати половину середньої довжини хвилі в системі розрахункового шторму, а відстані між полотнищами мають бути приблизно рівними чверті довжини розрахункової хвилі. Крайні від вісі каналів полотнища необхідно розміщувати нижче розрахункового рівня води портів 98% забезпеченості таким чином, щоб їх верхні частини були нижче розрахункової товщини рівного льодяного поля приблизно на 0,5м. Це дозволить уникнути примерзання верхніх частин крайніх полотниць з припайними та дрейфуючими рівними льодовими полями.

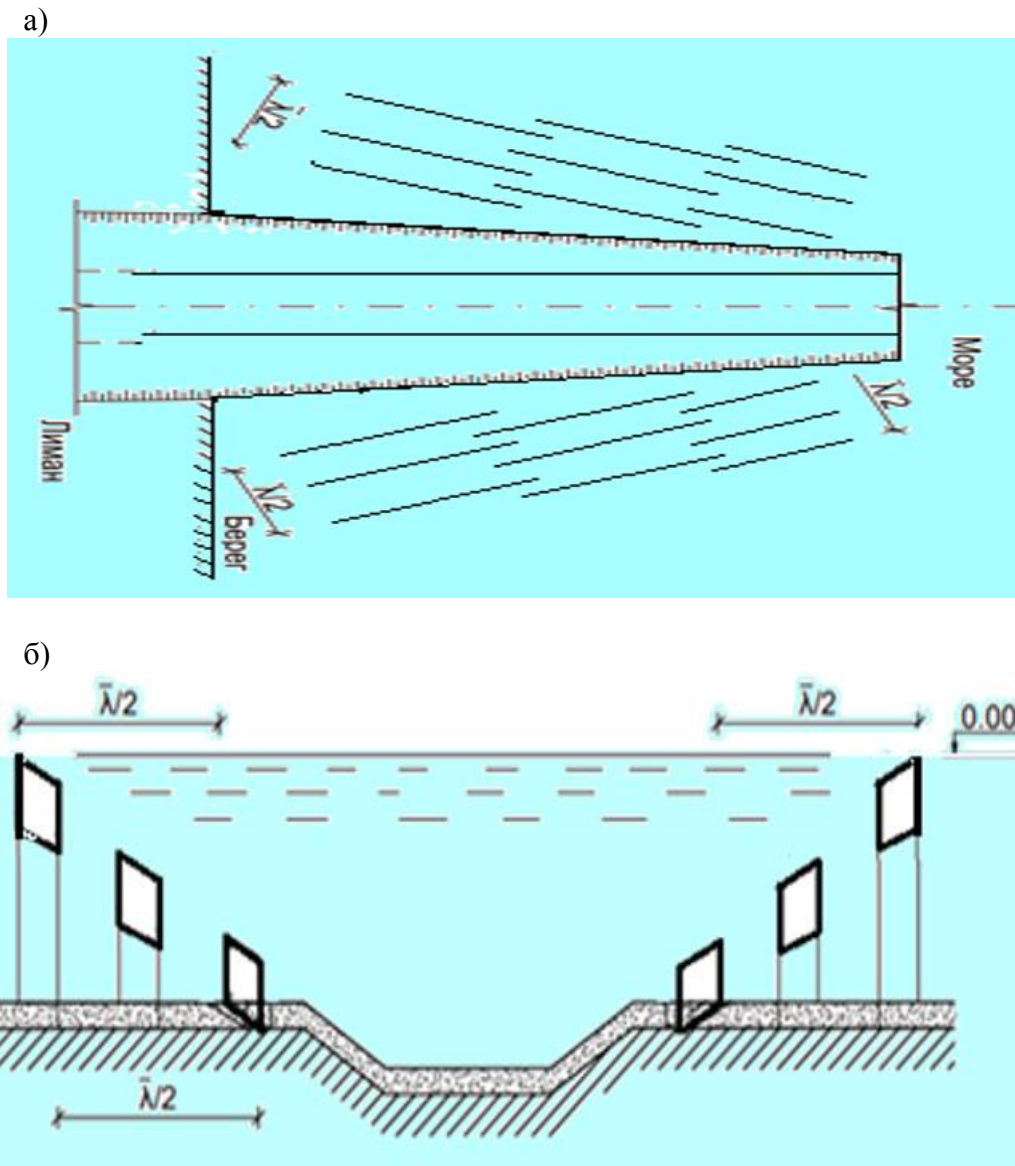


Рис. 5. Захист морських каналів гнучкими полотнищами з позитивною плавучістю:
а – план; б – розріз

Висновки.

1. Існуючі способи боротьби з занесенням морських каналів, в тому числі і підхідних, є занадто дорогими. Вони потребують регулярних витрат на ремонтні днопоглиблювальні роботи в процесі їх експлуатації.

2. Методи розрахунків транзитних об'ємів наносів недосконалі і потребують, для достовірних результатів, багатьох даних інженерних вишукувань по трасам морських каналів, що проектується.

3. Фізичне моделювання морських каналів на мілководних ділянках донних поверхонь дозволяє отримувати тільки якісну оцінку напрямків руху наносів при проектуванні загороджувальних гідротехнічних споруд в процесі їх наукового супроводу.

4. Використання загороджувальних гідротехнічних споруд для захисту морських каналів від занесення призводить до інтенсивного наповнення наносами простору між берегами та спорудами, сприяючи дефіциту наносів та руйнуванню прилеглих берегів на деяких відстанях від каналів.

5. Прорізи-пастки для перехоплення потоків наносів, розташованих вздовж морських каналів, сприятливо впливають на розміри параметрів штормових хвиль та потребують постійного контролю заповнення наносами їх об'ємів, корекції розмірів і планового

положення в процесі експлуатації.

6. Запропонований спосіб захисту від занесення морських каналів базується на істотному зменшенні донних хвильових швидкостей по всій глибині води безпосередньо на брівках каналів перед укосами. Впровадження цього способу в інженерну практику буде сприяти акумуляції донних наносів на брівках морських каналів, а, відповідно, збільшенню термінів міжремонтних днопоглиблювальних робіт.

7. Уточнення розміщення гнучких полотниць на брівках морських каналів та визначення ефективності цього способу можливе на основі аналізу результатів лабораторних та натурних експериментальних досліджень.

Література

1. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1990. 432 с.
2. Кожевников М.П. Гидравлика ветровых волн. М.: Энергия, 1972. 258 с.
3. Смирнов Г.Н. Океанология. М.: Высшая школа, 1987. 252 с.
4. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
5. Халфин И.Ш. Воздействие волн на морские нефтегазопромысловые сооружения. М.: НЕДРА, 1990. 310 с.
6. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа. Л.: Судостроение, 1986. 143 с.
7. Яковлев П.И., Супрун М.А., Стеблиенко В.Н. Дноуглубительные работы и технический флот. Одесса: Астропринт, 2002. 567 с.
8. Шуляк Б.А. Физика волн на поверхности сыпучей среды и жидкости. М.: Наука, 1971. 400 с.
9. Zwamborn J., Grieve G. Wave attenuation and concentration associated with harbor approach channels. *Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering*. 1974, pp. 2068-2085.
10. Leo C. van Rijn. Basics of channel deposition/siltation. 2016. 29 p.
11. Плавающий гнучкий хвилелом : пат. 136459 Україна : МПК E02B 3/06 (2006.01). № u 2019 00441 ; заявл. 16.01.2019 ; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16.
12. СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Минстрой России. М.: ГП ЦПП, 1995. 48 с.

References

- [1] D.D. Lappo, S.S. Strecalov, V.K. Zavjalov, *Nagruzki i vozdejstviya vetrovyh voln na gidrotekhnicheskie sooruzheniya*. L.: VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 1990.
- [2] M.P. Kojevnikov, *Gidravlika vetrovyh voln*. Moskva. «ENERGIJA», 1972.
- [3] G.N. Smirnov, *Okeanologija*. Moskva, «Vysshaja shkola», 1987.
- [4] I.O. Leontyev, *Pribrejnaja dinamika: volny, techenija, potoki nanosov*. Moskva, GEOS, 2001.
- [5] I.S. Halfin, *Vozdeistviye voln na morskije neftegazo-promyslovye sooruzhenija*. Moskva, «NEDRA», 1990.
- [6] T. Douson, *Proektirovanie sooruzhenij morskogo shel'fa*. L. Sudostroenie, 1986.
- [7] P.I. Jakovlev, M.A. Suprun, V.N. Steblienko, *Dnougлубitelnye raboty I tehnichecky flot*. Odessa: Astroprint, 2002.
- [8] B.A. Shuljak, *Fizika voln na poverhnosti sypuchey sredy i jydcojsty*. Moskva, Nauka, 1971.
- [9] J.A. Zwamborn, G. Grieve, "Wave attenuation and concentration associated with harbor approach channels", *Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering*, 1974, pp. 2068 – 2085.
- [10] Leo C. van Rijn, *Basics of channel deposition/siltation*, 2016.

- [11] Plavuchiy gnuchky khvylelom : pat. 136459 Ukrainy : MPK E02B 3/06 (2006.01). № u 2019 00441 ; zayavl. 16.01.2019 ; opubl. 27.08.2019, Bjul. № 16.
- [12] SNiP 2.06.04-82*. Nagruzki i vozdeystviya na gidrotehnicheskije sooruzeniya (volnovye, ledovye i ot sudov). Ministroy Rosii. Moskva, GPTPP, 1995.

PROTECTION OF SEA CHANNELS FROM SEDIMENTS

Rogachko S.I., Doctor of Technical Sciences, Professor,
rostasice@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5201-5368
Odessa National Maritime University
34, Mechnikova st., Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. Seaports of the world, which built in estuaries and bays, are connected to the seas by approach channels. When they crossing shallow water depths (milky water and surf zones), they are subjected to intensive drift by bottom sediments. It is main reason of decreasing of the depths in the channels over time and to reduce the terms between repair dredging works. The wave velocities are the main reason force of movement of bottom sediments. Projections of the velocities of water particles in waves on shallow water are described by various wave theories. Intensity of drifting to deposit due to a number of natural factors: topography of the sea beds; duration and the severity of storms; speeds of currents; types of bottom soils and their physical and mechanical characteristics. In addition, this process is influenced by the design profile of the channels and their planned position to the seaport gates. In the process of engineering studies and scientific support for the design of sea channels, the total volume of sediment flows and their general direction of transit are established, options for the planned location of channels routes, the angles of their slopes as well as options for protecting channels from drifting sediment are considered, taking into account the factors listed above. The analysis of all factors, as well as, the results physical and mathematical modeling allows take optimal design decisions on the location of the routes of sea channels, their dimensions taking into account the specifics of regions. The dimensions of estimated vessels, types of channels and cargo turnover of sea ports in the near future are also taken into account. The main requirements that apply to sea channels in their design are safe navigation of ships, the minimum amount of dredging works, as in the construction process, as well as exploitation. For this reason, the protection of sea channels from drifting by sediments is a very urgent technical problem. This problem was solved on the basis of analysis of existing methods for protection of sea channels in the shallow-water zones of the seas from the bottom sediments by developing a simple and inexpensive method. The mechanism of movement of bottom sediments under the action of wind waves and current was taking into account, when developing this method. The method proposed in this article is based on the principal of operation of a flexible floating breakwater, which patented in the state Ukraine.

Key words: sea channels, wind waves, bottom sediments, breakwaters, dredging works.

Стаття надійшла до редакції 1.08.2022

EVALUATION OF THE INTERRELATION OF HYDRAULIC AND THERMAL
RESISTANCE OF WATER HEATING SYSTEMS

¹**Petrash V.D.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
petrant@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0413-233X

²**Bassist D.V.**, Ph.D.,
baxist261@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5653-4851

¹**Geraskina E.A.**, Ph.D., Associate Professor,
poselok@te.net.ua, ORCID: 0000-0002-3308-3776

¹**Danichenko N.V.**, Ph.D., Associate Professor,
nikolai.danichenko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2344-948X

¹**Shevchenko L.F.**, Ph.D., Associate Professor,
bgedyx7@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3296-3007

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

²*KP "Budova"*
st. Osipova, 12, Odessa, 65012, Ukraine

Abstract. The work is aimed at an analytical solution of the problem of establishing the relationship between hydraulic and thermal stability for both traditional multi-storey and modern automated water heating systems for high-rise buildings. From the results of the review of scientific, technical, regulatory literature and patent search, it follows that the data and recommendations obtained are not exhaustive and require further research related to the solution of theoretical and practical tasks of the problem under consideration. Therefore, further improvement of heating systems determines the need to solve new scientific and technical problems, the results of which can create a scientific and methodological basis for improving the hydraulic and thermal stability, energy and overall efficiency of automated heating systems for multi-storey and high-rise buildings.

The result of the work was an analytical solution of the problem with the establishment of the regularity of the relationship between general hydraulic and thermal processes in the heating systems of high-rise buildings in order to analyze the conditions for a possible increase in their energy-technological efficiency. With quantitative and qualitative regulation of the thermal power of the systems, taking into account the change in the gravitational component, the actual pressure losses are compared with the drop for the options under consideration. The thermal power of heating systems was presented as the total heat flow from all heating devices, with the "lower" and "intermediate" location of the heat source. A new dependence is obtained by means of an irrational equation, which establishes an analytical relationship between the processes of thermal and hydraulic stability. It is shown that a new technical solution with an intermediate placement of a heat source along the height of the building minimizes the gravitational pressure during the operation of the heating system, as a result of which its vertical hydraulic stability increases, and, accordingly, the variable part of the excess pressure on the automation means decreases.

Key words: water heating systems, heat source, placement level, devices, hydraulic stability, thermal stability.

Introduction. In most European countries, more than 30-35% of the total consumption of fuel and energy resources is spent on heating buildings. Numerous studies have shown that the current potential for energy savings in Ukraine at the current level of heat supply of buildings reaches 50-60%. Therefore, the current state of the heat industry makes it urgent to find additional ways to significantly improve energy efficiency and quality of heat supply with a decrease in its unit cost.

Analysis of recent research and publications. The theoretical basis for the further advancement of the heat-hydraulic stability of water scorching systems, which is directly related to their energy efficiency and efficiency, was seen in the works of many domestic and foreign authors [1-3], which, in fact, laid the foundation for the theoretical construction of such a structure. However, the results of a long-term view of the scientific and technical, regulatory literature and patent literature are evidently obvious, that the withdrawal of data and recommendations will require further investigation, in relation to the theoretical and practical challenges of the problem. Therefore, further improvement of heating systems determines the need to solve new scientific and technical problems, the results of which can create a scientific and methodological basis for their practical application based on research results. Thus, the relevance and direction of this work are aimed at determining the conditions for improving hydraulic and thermal stability, energy and overall efficiency of automated heating systems of multi-storey and high-rise buildings [3-5].

Known water heating systems usually have a lower location of the intermediate heat exchanger or heat generator on the height of buildings, both central and local heating. The pressure drop in the system is determined by the variable value of the pump and gravitational components in ensuring the required circulation of the coolant. It is characteristic that the gravitational component of pressure in modern automated heating systems of buildings with a height of 5 to 25 floors reaches 25-45% [1, 3, 6]. Both the lower and upper location of the heat source ("roof" boiler room), which has become widespread in recent years, have their drawbacks. They relate primarily to the gravitational pressure, which coincides with or is opposite in action to the pump pressure.

It is characteristic that the increase of thermohydraulic stability of heating systems due to thermoregulatory means, including control valves with heating devices with high hydraulic resistance, as well as automatic pressure relief devices at the base of risers and mains, is largely unjustified, because they themselves bring a very significant additional hydraulic resistance. As a result, the hydraulic resistance of modern automated systems has increased 2-3 times over the past 20 years, and the unit cost of automation has reached 15-20% of the total cost of heating systems, but the payback period has decreased.

It is logical that the placement of the heat generator at a certain level in the height of the building [5, 7], can eliminate the action of the main factor of vertical hydraulic adjustment, which minimizes the resulting gravitational pressure in the circulation circuit of the pump heating system. At the same time, the energy and economic feasibility of using the formed systems with the "middle laying" of distribution and prefabricated mains, which are located at the level of the heat generator, is obvious. In most cases, the device of such systems may be more desirable in comparison with traditional systems with upper and lower location of the supply lines. In recent years, in foreign and domestic practice on energy-economic conditions and functional needs are justified technical solutions, providing for the arrangement of technical floors for the placement of elements of engineering systems, both in high-rise buildings and in buildings of high storeys [4, 8]. Thus increase of thermohydraulic stability of heating systems with decrease in their cost on the above-stated basis is not considered.

It should be noted that for all reasons of hydraulic adjustment, the change in the value of gravitational pressure is the most significant factor with the corresponding negative consequences characteristic of each type of heating system [9]. The main reason for both initial and operational regulation of heating systems is, first of all, the influence of natural pressures on water distribution, so to reduce its consumption should reduce the share of natural pressure difference in the total differential pressure difference.

In [7, 9] the approach to improvement of systems of water heating of high-rise buildings on the basis of rational interrelation and interrelation of structural elements is stated, that allows to increase the general efficiency of work of corresponding systems by excluding negative influence of gravitational pressure reducing vertical thermohydraulic regulation. As a result, the uniformity and efficiency of heat transfer processes of all heating devices both in the design and in the operating modes of the systems increases. In addition, the intermediate device of the heat source determines the technical and economic feasibility of the appropriate placement of common highways of heating systems. At the same time, first, the length of supply and return mains is

reduced, and also diameters of distribution and collecting pipelines decrease; second, the hydraulic resistance of the parallel connected sections of the upper and lower zones of the riser decreases, and as a result, the total hydraulic resistance of the whole system in comparison with the systems with the traditional placement of the heat source. At the same time, there is still no mathematically sound and acceptable for practice criterion of general assessment of hydraulic and thermal stability of water heating systems, which would adequately take into account the interrelated regime conditions for highly efficient operation in the process of their operational regulation.

The aim and objectives of the study. The aim of the work is an analytical study of the interconnected processes of hydraulic and thermal stability of automated water heating systems of high-rise buildings, aimed at further improving their thermal efficiency with reducing the corresponding material costs. To achieve this goal it is necessary to develop a mathematical model that summarizes the patterns of interconnected processes in ensuring hydraulic and thermal stability of water heating systems with the expansion of ideas about their further structural and functional improvement in ensuring optimal microclimatic conditions.

Material and methods of research. The paper uses a comprehensive research method, which includes: analysis of known theoretical and experimental works with a scientific generalization of the final results; computational-analytical and mathematical modeling, which is based on the classical equations of hydraulic and heat exchange processes, as well as a method of analytical solution of the problem. In accordance with the recommendations and requirements [1, 4-6] in the practice of engineering development of heating systems to ensure sufficient hydraulic stability it is recommended to take the pressure drop in the riser relative to the pressure drop in the calculated circulation circuit of at least 70%.

It is known [1, 3, 6] that the indicator of hydraulic stability G reflects the ratio of the actual consumption of coolant G_x to its calculated value G_c :

$$G = G_x / G_c . \quad (1)$$

The main condition for the hydraulic calculation of heating systems, which is associated with the selection of pipe diameters and determine the pressure drop in the relevant areas, is to compare the pressure drop with its actual value. In [7, 9] it is substantiated that in the heating system of a multi-storey building with intermediate placement of the heat exchanger at a rational level the effect of gravitational pressure is minimized in comparison with the similar one at the lower placement of the heat source. On this basis, under the conditions of quantitative and qualitative regulation of the thermal capacity of systems, taking into account the change in the gravitational component, we can compare the actual pressure loss with the difference for the analyzed options in the appropriate form:

$$S_{hs} G_c^2 = \Delta P_{pp}^c + \beta \Delta P_{gp}^c ; \quad (2)$$

$$S_{hs} G_x^2 = \Delta P_{pp}^c + \beta \Delta P_{gp}^x , \quad (2, a)$$

where S_{hs} – is the resistance characteristic of the heating system, $\text{Pa} \cdot \text{s}^2/\text{kg}^2$;

G_c, G_x – coolant flow at the calculated and variable values, kg/s ;

ΔP_{pp}^c – calculated pump pressure drop, Pa ;

$\Delta P_{gp}^c, \Delta P_{gp}^x$ – gravitational pressure of heating systems, respectively, at the lower and intermediate location of the heat exchanger, Pa ;

β – is the coefficient of gravitational pressure.

On the basis of dependencies (1) and (2), (2, a), the hydraulic stability of the scorching systems can be presented in an offensive way:

$$G = \frac{G_x}{G_c} = \sqrt{\frac{\Delta P_{pp}^c + \Delta P_{gp}^x}{\Delta P_{pp}^c + \beta \Delta P_{gp}^c}} . \quad (1, a)$$

The intermediate distribution of the heat source in a multi-storey building allows minimizing the gravitational pressure in the heating system with piece circulation, at the link with which the fallowness (1, a) is observed:

$$G = \sqrt{\frac{\Delta P_{pp}^c}{\Delta P_{pp}^c + \beta \Delta P_{gp}^c}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \beta \frac{\Delta P_{gp}^c}{\Delta P_{pp}^c}}} \quad (1, b)$$

The established dependence of the hydraulic resistance index (1,b) is illustrated by the graph, shown in Fig. 1, which shows that the minimization of the gravitational pressure relative to the pump provides a corresponding increase in the hydraulic stability of heating system.

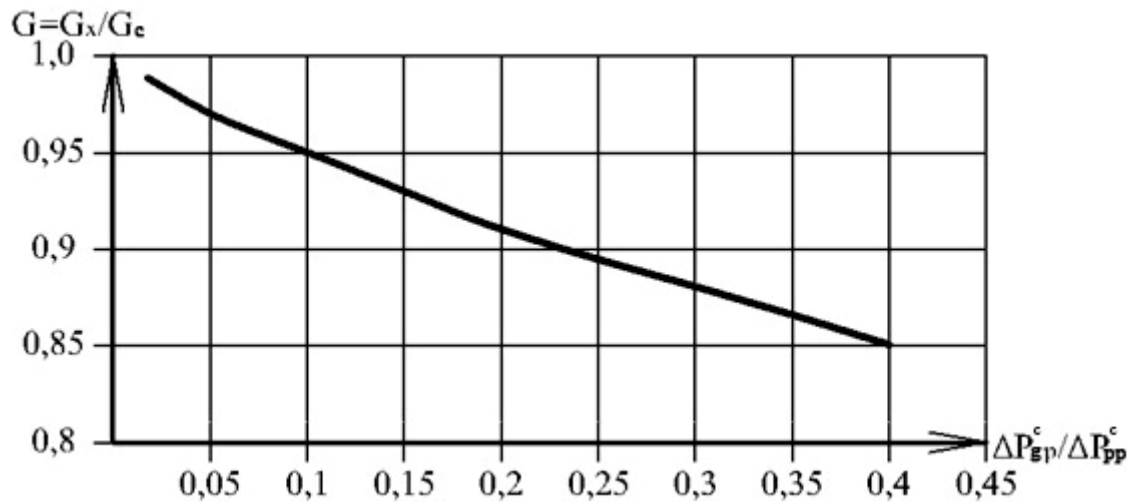


Fig. 1. The dependence of the hydraulic stability of the heating system of a multi-storey building on the ratio of gravitational and pumping components

It is known [1, 3, 6, 10] that an indicator of thermal stability T can be the ratio:

$$T = \frac{Q_x}{Q_c}, \quad (3)$$

where Q_x , Q_c – heat capacity in the intermediate and lower location of the heat exchanger, W.

If the heat output of heating systems is presented as the total heat flux from all heating appliances, then for the compared options at the "lower" and "intermediate" location of the heat source can be written:

$$Q_c = \alpha A \left(t_e^h - \frac{Q_c}{2cG_c} - t_r \right)^{1+m}; \quad (4)$$

$$Q_x = \alpha A \left(t_e^h - \frac{Q_x}{2cG_x} - t_r \right)^{1+m}, \quad (5)$$

where A – surface of scorch fittings, m^2 ;

α – constant heat transfer coefficient of the accessory;

t_e^h – is the heat transfer temperature at the entrance to the heating system, $^{\circ}C$;

t_r – the temperature in the room, $^{\circ}C$;

c – the average specific heat of the coolant, $J/(kg \cdot K)$;

m – step indicator at temperature pressure.

Representing the temperature difference of the coolant in the heating device in equations (4) and (5) at the lower location of the heat source in the form:

$$\frac{Q_x}{2cG_x} = \frac{\Delta t_r}{2},$$

and the corresponding value for the intermediate placement of the heat exchanger, taking into account the value $G = G_x / G_p$ and (3) in the form of:

$$\frac{Q_x}{2cG_x} = \frac{TQ_c}{2cG_cG} = \frac{\Delta t_r}{2} \frac{T}{G},$$

the dependence of the thermal stability on the hydraulic is expressed by an irrational equation (at $m = 0.1 \dots 0.5$) of the following form:

$$T = \left[\frac{(t_h^e - t_r) - 0,5\Delta_{,c} \frac{T}{G}}{(t_h^e - t_r) - 0,5\Delta_{,c}} \right]^{1+m} \quad (6)$$

In case of significant exchanges of water, the solution appears to be close at hand:

$$T = \frac{(t_h^e - t_r) - 0,5\Delta_{,c}}{(t_h^e - t_r) - 0,5\Delta_{,c}} \cdot x, \quad (6, a)$$

where x – is one of the values of $x_{1,2}$ with modulus $|x_{1,2}| < 1$, which is obtained using the corresponding Taylor series expansion, which takes place under the following restrictions:

$$x_{1,2} = \frac{1}{m(1+m)} \left[(k-1-m) \pm \sqrt{(k-1-m)^2 - 2m(1+m)} \right], \quad (7)$$

in which the generalized parameter k is calculated from the original data:

$$k = -\frac{(t_h^e - t_r) \Gamma}{0,5\Delta_{,c}} \cdot \left(\frac{(t_h^e - t_r) - 0,5\Delta_{,c}}{(t_h^e - t_r)} \right)^{1+m}. \quad (8)$$

Analysis of research results. The solution of the obtained equation (6) when combined with (1, b) is illustrated graphically in Fig. 2.

From the analysis of the presented graphical relationship it follows that the intermediate placement of the heat exchanger, which minimizes the gravitational pressure, provides an increase in hydraulic and thermal stability. The reduction of the gravitational component relative to the pump pressure from 30% to 5% increases, respectively, the hydraulic resistance by 10% (from 0.87 to 0.97) and thermal by 3.2% (from 0.96 to 0.99) in the system with the calculated temperature difference of the coolant (95–70) ° C.

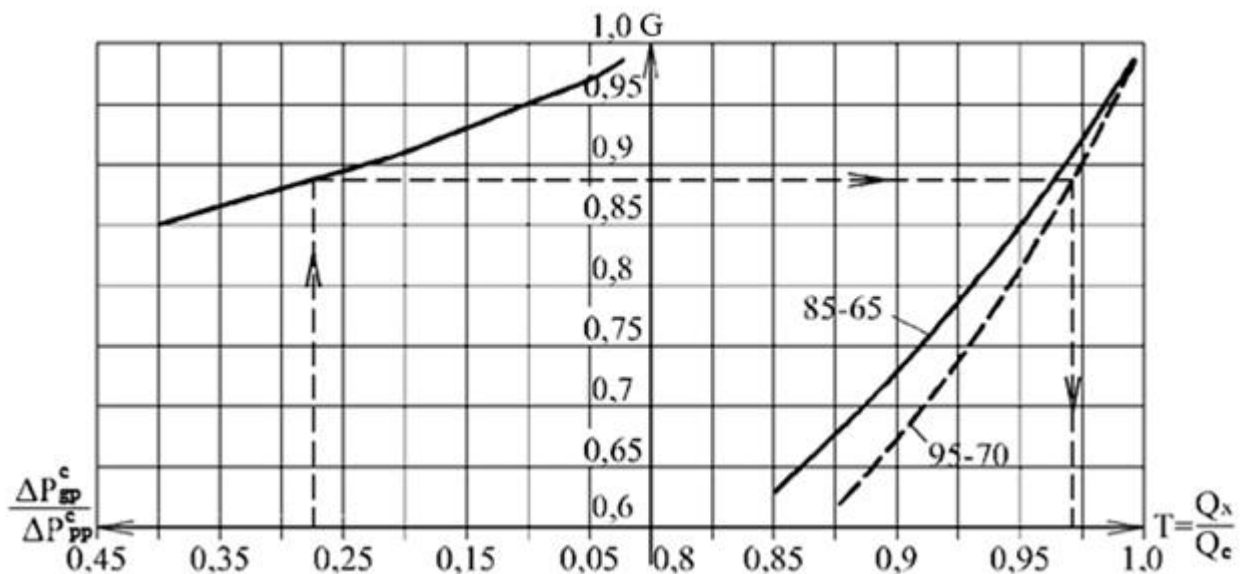


Fig. 2. Interrelation of indicators of thermal and hydraulic stability in heating systems of high-rise buildings

The scientific substantiation of improvement of an estimation of efficiency of high-rise buildings water heating systems on the basis of search of a rational level of intermediate placement of a heat source with the corresponding arrangement of mainlines has been received.

A new approach to the design and evaluation of improvement of water heating systems based on rational mutual arrangement and interconnection of structural elements is proposed, which allows to increase the overall efficiency of the systems by eliminating the negative influence of gravitational pressure, which reduces vertical heat and hydraulic regulation. As a result, the uniformity and efficiency of heat transfer processes of all devices, both in the design and in the operating mode of the systems.

Conclusions. Based on the results of the analytical study, a new dependence is obtained in the form of an irrational equation, which establishes the relationship between thermal and hydraulic stability. The new technical solution with intermediate placement of the heat source minimizes the gravitational pressure, which increases the vertical hydraulic stability of the system, and accordingly reduces the variable part of the excess pressure on the automation. The device of heating systems of high-rise buildings with intermediate placement of a heat source, minimizing gravitational pressure, increases hydraulic and thermal stability, and here reduces functional loading on means of automatic equipment and their cost.

References

- [1] L.M. Mahov, *Otoplenie*. M.: ASV, 2014.
- [2] G. Kraft. *Sistemy nizkoterperaturnogo otopleniya: perevod s nem.* Moskva: Stroizdat, 1983.
- [3] V.P. Turkin, *Vodiane systemy otopienya z avtomatycheskym upravlenyem dlia zhylykh i obshchestvennykh zdanyi*. M.: Strojzdat, 1987.
- [4] DBN V.2.5-67:2013. Opalennya, ventilyaciya ta kondiciyuvannya. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2013.
- [5] V.V. Pyrkov. *Osobennosti sovremennykh sistem vodyanogo otopleniya*. Kyiv: Takispravi, 2003.
- [6] Adolf Myrovsky, Hzeheosh Lanhe, Ireneush Elen. *Materyaly dlia proektyvania kotelnykh i sovremennykh sistem otoplenya*. Polsha.: Izdanye 1. Vissmann, 2005.
- [7] V.D. Petrash, D.V. Basist, "Sistema vodyanogo opalennya Petrasha V.D. z promizhnim rozmishchennyam teplogeneratora", Patent na vinakhid no. 97991. Byl 7, 2012, Derzhpatent, Ukraïna.
- [8] DBN V.2.2-41:2019. Visotni budivli. Osnovni polozhennya. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2019.
- [9] V.D. Petrash, D.V. Basist, "Novyjpodhod k ustrojstvu sistem vodyanogo otopleniya s promezhutochnym rozmeshcheniem istochnika teploty", *Naukovij visnik budivnictva*, vol. 60, pp.88-95, 2010.
- [10] V.D. Petrash, V.P. Baryshev, L.F. Shevchenko, E.A. Geraskina, "Issledovanie energotekhnologicheskikh parametrov v processah teplonasosnoj utilizacii teploty otrabotannykh gazov vrashchayushchihsiya pechej", *Problemy Regional'no jenergetiki*, vol. 2(50), pp. 76-89, 2021. doi.org/10.52254/1857-0070.2021.2-50.07.

**ОЦІНКА ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ГІДРАВЛІЧНОЇ ТА ТЕПЛОВОЇ СТІЙКОСТІ
В СИСТЕМАХ ОПАЛЕННЯ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ**

¹Петраш В.Д., д.т.н., професор,
petrant@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0413-233X

²Басист Д.В., к.т.н.,
baxist261@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5653-4851

¹Гераскіна Е.А., к.т.н., доцент,
poselok@te.net.ua, ORCID: 0000-0002-3308-3776

¹Даниченко М.В., к.т.н., доцент,
nicolai.danichenko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2344-948X

¹Шевченко Л.Ф., к.т.н., доцент,
bgedyx7@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3296-3007

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

²КП Будова

вул. Осипова,12, м. Одеса, 65012, Україна

Анотація. Робота спрямована на аналітичне вирішення завдання встановлення взаємозв'язку гідравлічної та теплової стійкості як для традиційних багатопверхових, так і сучасних автоматизованих систем водяного опалення висотних будівель. З результатів огляду науково-технічної, нормативної літератури та патентного пошуку випливає, що отримані дані та рекомендації не є вичерпними та потребують подальших досліджень, пов'язаних з вирішенням теоретичних та практичних завдань розглянутої проблеми. Тому подальше вдосконалення систем опалення визначає необхідність вирішення нових науково-технічних завдань, результати яких можуть створити науково-методичну базу для підвищення гідравлічної та теплової стійкості, енергетичної та загальної ефективності автоматизованих систем опалення багатопверхових та висотних будівель.

Результатом роботи стало аналітичне вирішення задачі із встановленням обліку закономірності взаємозв'язку спільних гідравлічних та теплових процесів в системах опалення висотних будівель для аналізу умов можливого підвищення їхньої енерготехнологічної ефективності. За умов кількісно-якісного регулювання теплової потужності систем, з урахуванням зміни гравітаційної складової, порівняно фактичні втрати тиску з перепадом для аналізованих варіантів. Теплову потужність систем опалення розглянуто як сумарний тепловий потік від всіх нагрівальних приладів, при «нижньому» та «проміжному» розташуванні джерела теплоти.

Отримано нову залежність у вигляді ірраціонального рівняння, якою встановлено аналітичний взаємозв'язок процесів теплової та гідравлічної стійкості. Показано, що нове технічне рішення з проміжним розміщенням джерела теплоти по висоті будівлі мінімізує гравітаційний тиск при роботі системи опалення, внаслідок чого підвищується її вертикальна гідравлічна стійкість, а відповідно зменшується змінна частина надлишкового тиску на засоби автоматики.

Ключові слова: системи водяного опалення, джерело теплоти, рівень розміщення, прилади, гідравлічна стійкість, тепла стійкість.

Стаття надійшла до редакції 3.05.2022

POROUS DRAINAGES FOR CONTACT CLARIFIERS

¹**Progulny V.**, D.Sc., Professor,
varkadia@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8310-3823

¹**Grachov I.**, Senior Lecturer,
giawork@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4173-4452

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

Abstract. Filtering facilities are essential for the technological schemes for natural water treatment. They provide the required water quality as well as the valuable capacity of water treatment facilities. Contact clarifiers are widely used to purify water with low turbidity and high color values. Single-stage filtration based on the principle of contact coagulation uses it. Possible complications in the operation of contact clarifiers are usually related to running the drainage distribution system.

The authors formulated several basic drainage requirements, particularly the uniform distribution of wash water over a space and the absence of filter load removal.

The article analyzes the existing drainage structures (drainage with supporting layers of gravel and a gravelless pipe distribution system), which shows that they do not meet the requirements. They lead to irregular washing of the filter load, a decrease in its dirt capacity, an increase in residual contaminants, a reduction in the filter cycle, and an increase in the maintenance cost.

To improve reliability and durability, a drainage design is proposed that consists of perforated reinforced concrete slabs, with porous polymer concrete in their holes, made of crushed granite or gravel and a polymer binder, i.e., epoxy resin. This construction will ensure a uniform velocity field during washing and filtering, reduce water consumption for its own needs, increase the filter cycle, and prevent possible removal of the filter load.

It is found that the colmatation of the pore space with a suspended matter is one of the main issues when considering the porous drainage in the structure of contact clarifiers.

The article presents experimental studies of the dynamics and degree of the colmatation in porous polymer concrete with polluted water. They showed that no irreversible colmatation happens, and the data obtained will allow us to use them during the hydraulic calculations.

The task of further research is to conduct full-scale tests on existing facilities.

Keywords: contact clarifier, colmatation, drainage, contact coagulation, coefficient of hydraulic resistance.

Introduction. One of the water supply problems in Ukraine and abroad is the purification of highly colored low-turbidity waters, which is typical for a particular category of rivers and reservoirs [1]. Many facilities use modern coagulants and flocculants instead of traditional ones to increase the efficiency of removing natural organic substances. However, this does not always lead to a tangible impact due to insufficient knowledge of the following: the reagent treatment process, depending on the nature of organic contaminants (which cause the color of water), the existing technological and design flaws (which are inherent in the very beginning of the purification process, when introducing reagents and mixing with the flow of the treated water) as well as – the organization of the process of flocculation.

Contact clarifiers (CC) are a more complete solution to the problem of purification of high-color low-turbidity waters. They are structures for clarification and decolorization of water, combining the functions of a flocculation chamber, a sump, and a quick filter. The action of CC is based on the principle of contact coagulation, which lies in the fact that when water moves through a layer of granular loading, colloidal and suspended aggregately unstable parts are adsorbed on the surface of the grains of the filter material. It provides, just as in contact filtration, more complete

coagulation, the possibility of reducing the doses of reagents, and the independence of the required amounts from the temperature and alkalinity of the water [2]. In this regard, improving the CC's design parameters is relevant to ensure their regular operation.

Analysis of recent research and publications. There are several types of contact clarifiers CC-1, CC-2, and CC-3. Structurally, CC-1 does not differ from a conventional fast filter. It is a reinforced concrete rectangular tank (Fig. 1) with a load of granular layers constantly decreasing from the bottom up. So the central part of the contaminants is retained in the lower coarse-grained layers. In this design, the filtrate is being removed from the overload water layer. At the same time, the filtration rate (with an average sand grain size of 0.8 mm) should not exceed 5-5.5 m/h to avoid sand weighing. In CC-2 clarifiers, the filtrate is being removed from the upper part of the filter layer. It allows to increase the calculated filtration rate (up to 10 m/h) but raises the cost of the drainage system. The CC-

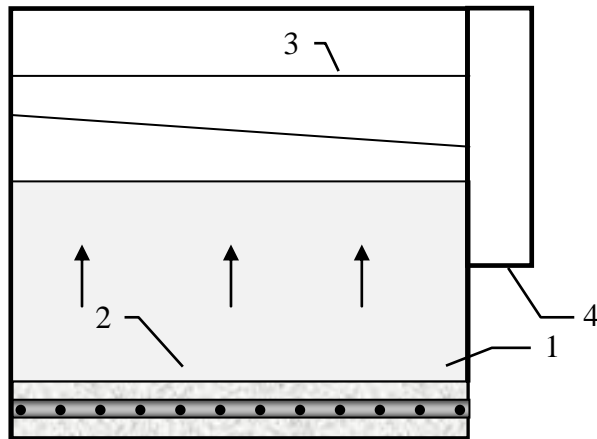


Fig. 1. contact clarifier CC-1: 1 – filter loading; 2 – drainage; 3 – gutter; 4 – collecting channel

3 clarifiers use water-air washing of the filter loading. CC-3 has a "low horizontal outlet" for the wash water. Moreover, CC-3 clarifiers can have two drainage systems for air and water.

The efficiency of water purification at CC is determined mainly by the operation of the drainage distribution system. And the operational experience shows it is the most often tricky part [3, 4]. There are several requirements for CC drainages, particularly the uniform distribution of wash water over a space and the absence of filter load removal. However, existing drainage designs do not always meet these requirements. It leads to irregular washing of the filter load, a decrease in its dirt capacity, an increase in residual contaminants, a reduction in the filter cycle, an

increase in the maintenance cost, and reducing the overall reliability of the CC [5, 6].

For a long time, CC drain designs have used a high-resistance tubular distribution system with supporting gravel levels similar to fast filter drains. A significant disadvantage of such drainages is the possibility that gravel layers will shift during flushing, leading to a complete shutdown of the CC and the need for overhaul [7].

Later, a gravelless tubular distribution system (GTDS) was developed, a method of distribution pipes with 10–12 mm holes in diameter, staggered and directed downward at an angle of 30° to the vertical axis of the pipe [8].

Vertical metal curtains are welded to the pipes on their sides without reaching the bottom of the CC. Between the shutters, transverse partitions are welded, reaching the bottom and dividing the underripe space into cells (Fig. 2).

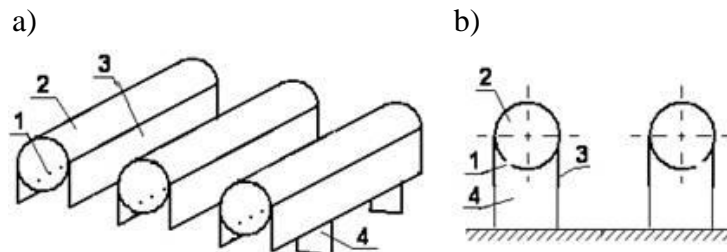


Fig. 2. Gravelless tubular distribution system (GTDS) for a CC: a – appearance; b – transect; 1 – holes in pipes; 2 – water distribution pipes; 3 – side curtains; 4 – transverse partitions

The advantage of GTDS is the absence of supporting layers; the disadvantage is the need for drainage from steel pipes, their possible corrosion, and the complexity of welding and installation. When flushing water is supplied by pumps (without a tower), there is a risk of sand entering the drainage pipes during an emergency power outage.

Therefore, using porous materials in drainage devices will significantly improve their performance and ensure the fulfillment of their requirements.

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture (OSACEA) has developed several design options for the drainage of rapid water treatment filters based on porous polymer concrete. The most common of them are tray and perforated [9].

The first one consists of polymer concrete slabs mounted on supporting concrete walls (Fig. 3). Branch pipes are installed at the inlet to each tray. The resistance of branch pipes ensures the required uniform distribution of water flow rates between the channels.

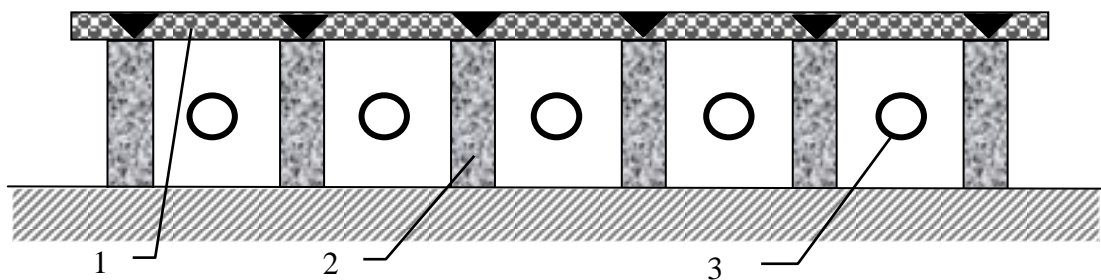


Fig. 3. Tray design of polymer concrete drainage:

1 – porous slab; 2 – supporting concrete walls; 3 – branch pipes of high resistance

In cases of increased requirements for water quality (for example, in terms of silicon content), there are structures that consist only of plastics, the base of the drainage is a vinyl plastic sheet, and the porous layer is made of polystyrene. There is a modification designed not only for water but also for water-air and alternating flushes.

The second structure consists of a reinforced concrete slab (Fig. 4), the holes filled with porous polymer concrete with a size of 7-10 mm. From above, it is also covered with a layer of porous polymer concrete with a size of 3-5 mm and a thickness of 20 mm to prevent the formation of "dead" zones between the holes.

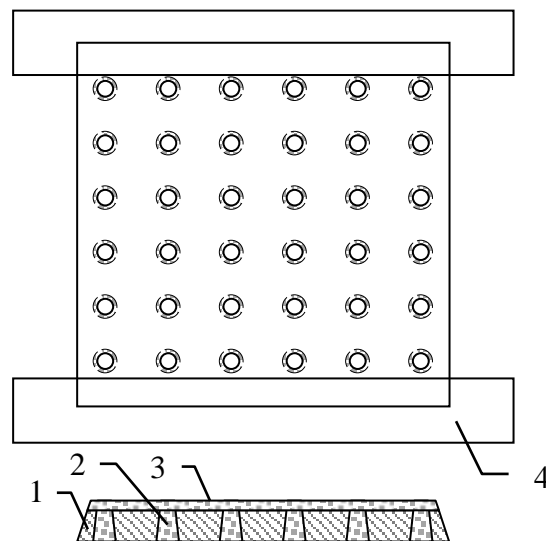


Fig. 4. Drainage slab:

1 – reinforced concrete slab; 2 – holes filled with polymer concrete; 3 – a layer of polymer concrete; 4 – supporting elements

Plates are mounted on supporting elements. Holes in the slabs are tapered upwards to prevent the separation of polymer concrete from reinforced concrete. The side ends of the plates are beveled to simplify the sealing of joints after the installation of the plates.

In this design, in comparison with the tray, due to the reinforced concrete frame, the drainage has a greater bearing capacity, and simultaneously, the consumption of expensive polymer concrete is reduced.

Both designs have been successfully implemented on fast filters of many water pipelines in Ukraine and other countries. They have shown reliable operation over a long service life.

Porous structures are made of porous polymer concrete made of gravel or crushed stone and epoxy resin grade ED-16 or ED-20 with a polyethylene polyamine hardener permitted by the Ministry of Health of Ukraine for drinking water supply systems. This material has high strength, increased chemical resistance to the aggressive effects of water treated with reagents, and the absence of biofouling during long-term operation [10].

Goals and tasks. The colmatation of the pore space with a suspended matter is one of the main issues when considering the porous drainage in the structure of contact clarifiers. In this regard, the present research aims to study the dynamics and degree of the colmatation in porous polymer concrete with polluted water.

Materials and research methods. The Department of Water Supply of OSACEA has already done studies of this kind. However, they related to the designs of drainages and systems for removing wash water from fast filters [11]. In this case, the movement of water was carried out with flow reversal during washing and filtering, which reduced the overall degree of polymer concrete colmatation.

A feature of CC is that the movement of water in the process of filtering and washing goes in the same direction. In addition, unlike fast filters, it is not the filtrate that enters the drainage but raw water with the coagulant introduced into it. Therefore, there is a possibility of irreversible colmatation of the pore space of the polymer concrete with a suspension and flakes of the coagulant. In other words, contact coagulation may start not in the filter loading but in the porous drainage, which will complicate the further work of the CC.

Given the above, CC drainage can be a structure consisting of perforated reinforced concrete slabs with porous polymer concrete filled in their holes. This construction will ensure a uniform velocity field during washing and filtering, increase reliability and durability and prevent possible removal of the filter load. Compared to the tray design, the speed of water movement in the holes, especially during flushing, will be several times higher, which should help restore its capacity.

To test the assumptions, experimental studies were carried out to check the dynamics of colmatation of porous polymer concrete on a laboratory installation, which consists of two tanks located one above the other with a capacity of 150 liters each. The tanks are connected by a vertical pipe 40 mm in diameter with flanges in the middle, and a test sample made of porous polymer concrete was placed between them. The water became polluted in the upper tank to a concentration of 50-60 mg/l; the coagulant aluminum sulphate was included with a dose of 20 mg/l [8].

The test sample was made in a metal case 40 mm in diameter with two-layer porous polymer concrete: the first layer was 7-10 mm in size and 70 mm thick; the second layer was 3-5 mm and 20 mm thick. The pressure loss in a porous layer is generally described by a two-term additive dependence [12]:

$$h_c = H - h = a_2 V_f + b_2 V_f^2, \quad (1)$$

where H is the piezometer above the sample; h is the piezometer under the sample; V_f is the rate of filtration through a porous sample; a_2 and b_2 are coefficients that depend on the characteristics of the porous sample wall (thickness, grain diameter, porosity), water viscosity and are usually determined experimentally.

The main advantage of this formula is that it can be used over a wide range of Reynolds numbers. At low filtration rates (and low Re), the second term becomes negligible, and formula (1) corresponds to the Darcy formula. Only the second term of the formula works at high speeds, and the dependence of pressure loss on speed is quadratic. However, as the analysis showed, fluid movement through the porous walls of the drains occurs in a transient mode, so both terms of the formula must be used here. And this requires the determination of two empirical coefficients – a_2 and b_2 , which creates difficulties in engineering calculations.

However, the two-term formula (1) can be replaced by a one-term power formula that is more convenient for calculations [13]:

$$\Delta h = C \delta_p v^{2-n} V_f^n, \quad (2)$$

where Δh is the pressure loss in a porous sample, cm; δ_p – sample thickness, cm; v is the kinematic viscosity of water, cm^2/s ; V_f is the filtration rate, cm/s ; C is a coefficient depending on the granulometric composition of the polymer concrete filler and the degree of density of its laying (in the case of filtering contaminated water, the coefficient C also takes into account the colmatation of pores by suspended particles); n is the exponent, which can be taken equal to 1.67 (determined empirically).

With a constant exponent n , to use formula (2), it is enough to know only one value – the coefficient C .

The studies were carried out in two stages: at the first stage, the hydraulic characteristics of the sample were studied, and at the second stage, the degree of its colmatation with a suspension.

The purpose of the first stage of research was to obtain the initial coefficient of hydraulic resistance C on pure water.

Raw water with a turbidity of 50 mg/l and treated with aluminum sulfate coagulant was filtered through the sample at the second stage of the experiment. The sample was washed with clean water for 6 minutes after 8 hours. Thus, the operation of CC during filtration and washing was simulated. The speed during filtration was 2-2.2 cm/s , while during the washing it was 24 cm/s . This would correspond to production data.

Research results. The dynamics of changes in the coefficient of hydraulic resistance of porous polymer concrete C in time were carried out by plotting the dependence $\bar{C} = C/C_0 = f(t)$, where C_0 is the initial coefficient of hydraulic resistance. The results of the experiments are presented in the graph (Fig. 5).

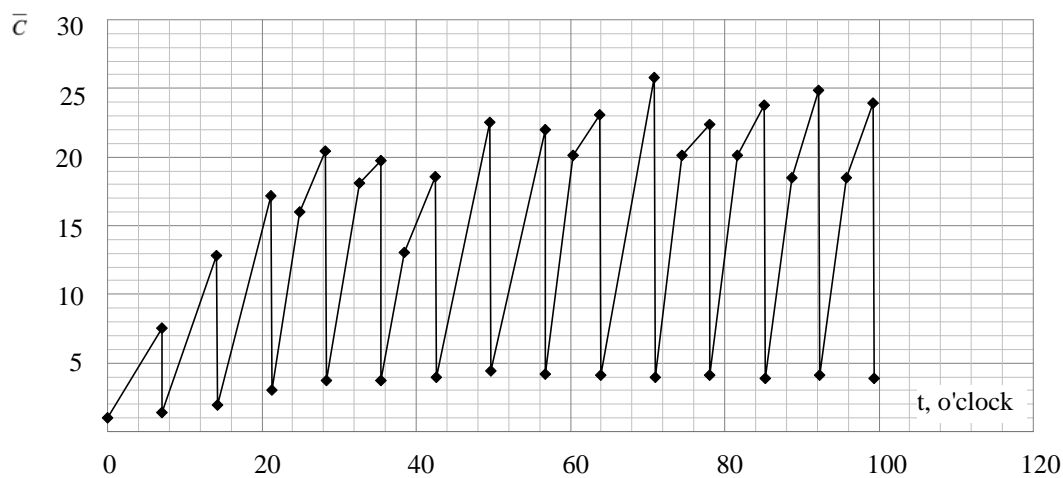


Fig. 5. Change in hydraulic resistance coefficient \bar{C} over time

The upper points correspond to the change in the coefficient \bar{C} during filtration; the lower points equal the change in the coefficient during washing.

It can be seen from the graph that the coefficient initially grows, and then, starting from 50 hours of operation (approximately six filter cycles), it stabilizes and subsequently remains practically unchanged. In this case, the maximum values of \bar{C} are about 24 during filtration and 4, respectively, during washing, which indicates a partial recovery of the throughput of the sample. The nature of the obtained curve corresponds to the results of previous work on the study of polymer concrete colmatation at the Department of Water Supply.

Therefore, experimental studies' data can be considered in the engineering method of hydraulic calculation of perforated polymer concrete drainage of CC.

However, it should be noted that the conclusion on the possibility of using porous drainage in CC structures can only be made after conducting field studies on existing systems.

Conclusions:

1. Using porous drains in CC designs will improve the uniformity of distribution of wash water over the area, reduce water losses for own needs, increase the filter cycle, and increase the reliability of CC operation. At the same time, the irreversible colmatation of porous polymer concrete does not occur, as confirmed by laboratory studies.

2. The task of further research is to conduct full-scale tests on existing structures.

References

- [1] Natsional'na dopovid' pro yakist' pytnoi vody ta stan pytneho vodopostachannya v Ukraini u 2016 rotsi. Baza danykh "Minrehion Ukrainy". [Online]. Available: <http://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/teplvodopostachannya-ta-vodovidvedennya/natsionalnadopovid/proekt-natsionalnoi-dopovidi-pro-yakistpitnoi-vodi-ta-stan-pitnogo-vodopostachannya-vukrayini-u-2016-rotsi/>
- [2] *Voda ta vodoochysni tekhnolohiyi. Naukovo-tekhnichni visti*, K.: 2016. no. 2.
- [3] S. Epoyan, A. Karahiaur, V. Volkov, S. Babenko, "Research into the influence of vertical drainage elements on the operational efficiency of rapid filters", *Eastern-European Journal of Enterprise Technology*, no. 1/10 (91), pp. 62-69, 2018.
- [4] V. Progulny, M. Ryabkov, K. Borysenko, I. Grachov, "Theoretical and experemential study of mud injection porous drainage in filters with floating loading", *TEHNIČKI GLASNIK (Technical journal)*, vol. 12, no. 4, pp. 231-235, 2018.
- [5] 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. <https://doi.org/10.1002/ird.67>.
- [6] L.K. Smedema, S. Abdel-Dayem, W.J. Ochs, "Drainage and agricultural development", *Irrigation and Drainage*, no. 14, pp. 223-235, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1026570823692>.
- [7] H.I. Nikoladze, *Tekhnolohiya ochyshchennya pryrodnykh vod*. M.: Vyshcha shkola, 1987.
- [8] DBN V.2.5-74:2013. Vodopostachannya. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennya proektuvannya. K.: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunal'noho hospodarstva Ukrainy, 2013.
- [9] P.A. Grabovskiy, G.M. Larkina i dr., "Intensifikatsiya vodoochistnykh fil'trov", *Vodosnabzheniye i vodootvedeniye*, no. 6, pp. 38-48, 2012.
- [10] V.M. Vyrovoy, I.V. Dovhan', S.V. Semenova, "Osoblyvosti strukturoutvorenniya ta formuvannya vlastyvostey polimernykh kompozytsiynykh materialiv", Odesa.: TES, 2004.
- [11] P.A. Grabovsky, V.I. Progul'nyy, G.M. Larkina, "Poristy polimerbeton v konstruktsiyakh vodoprovodnykh sooruzheniy", *Energoyefektyvni tekhnologii v mis'komu budivnytstvi ta gospodarstvi: mat-ly IV mezhd. nauch.-prakt. konf.* Odesa, pp. 65-67, 2014.
- [12] M.E. Aerov, O.M. Todes, D.A. Narins'kyy, *Aparaty zi statsionarnym zernystym sharom: Hidravlichni ta teplovi osnovy roboty*. L.: Khimiya, 1979.
- [13] V. Progulnyi, M. Ryabkov, "Application of porous drainage in filters with floating media", *Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk*, no. 2 (19), pp. 143-146, 2015.

ПОРИСТІ ДРЕНАЖІ КОНТАКТНИХ ОСВІТЛЮВАЧІВ

¹Прогульний В.Й., д.т.н., професор,
varkadia@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8310-3823

¹Грачов І.А., ст. викладач,
giawork@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4173-4452

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

Анотація. Фільтрувальні споруди є важливим елементом у технологічних схемах очистки природних вод. Вони забезпечують необхідну якість води та корисну продуктивність водоочисних споруд. Для очищення малокаламутних вод з високими показниками кольоровості широке застосування знайшли контактні освітлювачі, які використовуються при одноступінчастому фільтруванні, заснованому на принципі контактної коагуляції. Можливі ускладнення у роботі контактних освітлювачів нерідко пов'язані з функціонуванням дренажно-розподільчої системи.

Авторами сформульовано ряд основних вимог, які пред'являються до дренажів цих споруд, а саме – забезпечення рівномірного розподілу промивної води по їх площі та недопущення винесення фільтруючої загрузки.

У статті наведено аналіз роботи існуючих конструкцій дренажів (трубчастий дренаж з підтримуючими шарами гравію і безгравійна трубчаста розподільна система), який показав, що ці конструкції не забезпечують виконання вимог, які пред'являються до них. Це призводить до нерівномірного промивання фільтруючого завантаження, зниження її брудоемності, зростання залишкових забруднень, скорочення фільтроциклу, збільшення витрат на власні потреби.

Для підвищення надійності та довговічності запропоновано конструкцію дренажу, яка складається з дірчастих залізобетонних плит, отвори яких заповнені пористим полімербетоном, виробленим на основі гранітного щебеню або гравію та полімерного зв'язуючого – епоксидної смоли. Ця конструкція дозволить забезпечити рівномірне поле швидкостей при промиванні та фільтруванні, скоротити втрати води на власні потреби, збільшити фільтроцикл, запобігти можливому винесенню фільтруючого завантаження.

Встановлено, що одним із головних питань, що виникають при розгляді можливості застосування пористих дренажів у конструкціях контактних освітлювачів, є кольматація їх порового простору завією.

У статті наводяться результати експериментальних досліджень динаміки та ступеня кольматації пористого полімербетону забрудненою водою, які показали, що незворотної кольматації не відбувається, а отримані дані дозволяють використовувати їх при виконанні гідравлічних розрахунків.

Завданням подальших досліджень є проведення натурних випробувань на діючих спорудах.

Ключові слова: контактний освітлювач, кольматація, дренаж, контактна коагуляція, коефіцієнт гідравлічного опору.

Стаття надійшла до редакції 15.08.2022

ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ДІЛЯНКИ СХИЛУ ОДЕСЬКОГО УЗБЕРЕЖЖЯ

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

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 спостерігається скорочення майданчиків, зручних для будівництва об'єктів. У зв'язку з цим, все частіше постає питання про освоєння нових територій, які раніше вважалися непридатними або економічно невігідними для будівництва. Дуже часто доводиться зводити будівлі та споруди на схилах або поблизу них. Освоєння зсувних та зсувонебезпечних схилів вимагає комплексного вивчення, результати якого повинні використовуватись при виборі заходів інженерного захисту територій, а також проектуванні і будівництві на схилах. Основним завданням інженерів, при виконанні проектно-вишукувальних робіт на зсувонебезпечних територіях, є оцінка стійкості схилу та величини зсувного тиску.

У статті виконані розрахунки стійкості ділянки зсувонебезпечного схилу Одеського узбережжя з ціллю подальшого будівельного освоєння. Схил, що розглядається, розташований на Французькому бульварі, в районі санаторію імені Чкалова. Особливості ділянки полягають у складних інженерно-геологічних умовах (лесові ґрунти, просадні властивості ґрунтів, кілька водоносних горизонтів). Встановлено, що раніше на цій ділянці відбувалися глибокі блокові зсуви видавлювання. Після проведення протизсувних заходів, які полягали в будівництві морських берегоукріплювальних та дренажних споруд, відмічено підвищення стійкості схилу. Незважаючи на виконані заходи, відзначається розмив пляжу з частковим руйнуванням берегозахисних споруд, що може призвести до активізації абразії і негативно вплинути на стійкість всього схилу.

Розрахунки стійкості схилу виконані у двовимірній та тривимірній постановках. За плоскими схемами розрахунки виконані в програмному комплексі «Slide» методами Бішопа та Янбу. Оцінка стійкості схилу у тривимірній постановці виконана методом скінченних елементів із застосуванням розрахункової програми Midas GTS NX і складається з визначення напружено-деформованого стану ґрунтового масиву та коефіцієнту запасу стійкості. На основі отриманих результатів розрахунку дана оцінка стійкості схилу та запропоновані варіанти протизсувних (утримуючих) споруд.

Ключові слова: зсув, схил, розрахункова схема, коефіцієнт запасу стійкості, протизсувні споруди, бурова паля, барета.

Вступ. На території України зафіксовано близько 23 тис. зсувів і з кожним роком їх кількість зростає. Зсуви характерні для узбережжя Чорного і Азовського морів (Одеська, Миколаївська, Донецька, Запорізька області), а також Харківської, Закарпатської, Львівської, Івано-Франківської областей. До основних природних чинників, що викликають розвиток та поширення зсувних процесів відносяться: інженерно-геологічні умови схилу, гідрогеологічні умови, абразія, рельєф місцевості, клімат, ерозія. Крім природних факторів, які впливають на стійкість зсувних та зсувонебезпечних схилів, значний вплив на існуючі зсувні процеси та утворення нових зсувів мають техногенні фактори.

Одеська область займає перше місце в Україні як за загальною кількістю зсувів, так і за кількістю активних зсувів. В області зафіксовано 5836 зсувів, загальною площею 66,3 км², у межах забудованих територій знаходяться 156 зсувів [1]. Площа зсувонебезпечних ділянок

становить майже 20% території області. Великі за площею і небезпечні зсуви розвиваються на узбережжі Чорного моря та схилах лиманів. В останні роки відзначено підвищення активізації старих та виникнення нових зсувів на ділянках схилів у с. Фонтанка Лиманського району, м. Чорноморськ Овідіопольського району, м. Одеса (16-та станція Великого Фонтану, с. Чорноморка, Аркадія, Французький бульвар).

В даний час все частіше для будівництва вибираються майданчики, що розташовані на схилах або поблизу них. Схили Одеського узбережжя з відносно сприятливими інженерно-геологічними умовами практично забудовані. Подальше будівництво на схилах пов'язане з вибором майданчиків зі складними інженерно-геологічними умовами, що вимагають спеціальної інженерної підготовки щодо запобігання або стабілізації зсувів у процесі будівництва різних об'єктів та їх подальшої експлуатації.

Під час будівництва на схилі або біля нього може виникати техногенний зсув в результаті зміни напружено-деформованого стану і міцністних властивостей ґрунтів, які складають схил. Активізація зсувів має руйнівний, а іноді катастрофічний характер, що створює постійну загрозу виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру, а також небезпеку для здоров'я та життя людей. Таким чином, питання вивчення зсувних процесів, оцінки стійкості схилів, проектування та будівництва протизсувних споруд є актуальними, оскільки економічні збитки.

Аналіз досліджень та публікацій. Зсувні процеси на схилах Одеського узбережжя спостерігаються з моменту заснування міста. Перші дослідження Одеських зсувів належать французькому інженеру Жюсту Гаюї.

Вивченню і опису зсувів Одеського узбережжя, аналізу причин і чинників їх формування присвячені роботи І.Ф. Синцова. Він висунув теорію походження Одеських зсувів, багато положень якої залишаються актуальними і у наш час [2]. Причини утворення і заходи із стабілізації зсувів розглянуті у роботах О.К. Алексєєва, М.Ф. Бєсчастного, І.Я. Яцько, А.М. Дранникова, Л.Б. Розовського, І.П. Зелінського, В.М. Воскобойнікова [3-6] і багатьох інших авторів.

Методи моделювання зсувів для вирішення завдань про напружений стан порід і стійкість зсувних схилів і укосів складної геологічної будови були розглянуті у роботі [7]. Проблеми моделювання напруженого стану та оцінки стійкості зсувних схилів, а також інженерно-геологічної ефективності заходів в галузі інженерного захисту територій висвітлюються в роботі [8].

Роботи [9, 10] присвячені розвитку методів розрахунку схилів та зсувів, а також математичному моделюванню зсувних процесів при сейсмічних впливах. У роботі [11] розглядається новий метод розрахунку схилів з врахуванням пружно-пластичних властивостей ґрунтів, які моделюються за теорією течії зі зміцненням, при статичних навантаженнях на схил.

В одній з останніх робіт [12], на основі аналізу результатів розрахунків реальних схилів у м. Одеса (на території Грецького парку, на площі Думській, на Французькому бульварі та ін.), відмічений вплив форми схилу на величину його коефіцієнта запасу стійкості. Автором розроблений метод розрахунку стійкості ґрунтових споруд і природних схилів за двовимірними схемами інженерними методами, з врахуванням їх просторового ефекту. Запропонований метод розрахунку стійкості за двовимірними схемами при застосовуванні виведеного поправочного коефіцієнта дозволяє оцінити ступінь стійкості схилу з урахуванням його геометричних особливостей.

Метою роботи є оцінка стійкості ділянки зсувонебезпечного схилу Одеського узбережжя для визначення можливості подальшого будівельного освоєння.

Методи досліджень. Розрахунки стійкості ділянки схилу проводились чисельними методами. Оцінка стійкості у двовимірній постановці виконана методами Бішопа та Янбу за фіксованими кривими ковзання. Також були виконані розрахунки напружено-деформованого стану (НДС) схилу за методом скінчених елементів (МСЕ), з визначенням коефіцієнту запасу стійкості методом редуції у тривимірній постановці.

Результати дослідження. Ділянка схилу, що розглядається, розташована на Французькому бульварі, в межах III зсувного амфітеатру, що охоплює територію узбережжя від мису біля північного кордону санаторію «Чкалова» до гідрометеорологічної станції (район санаторію «Росія») та ділянкою плато, що примикає до нього. Позначки поверхні плато складають 44,50-47,30 м.

Геологічний розріз схилу представлений комплексом деплясивних та детрузивних четвертинних та неогенових відкладень. Зсувне тіло розбите на блоки, складені лесовидними ґрунтами, глинами, вапняками. У рельєфі схилу ці блоки утворюють шаблі та горби, розділені западинами та тріщинами.

За даними інженерно-геологічних досліджень на ділянці схилу виділені наступні інженерно-геологічні елементи (ІГЕ) [13]:

ІГЕ-2 – суглинок лесовидний, легкий, твердої консистенції; ІГЕ-3 – супісок лесовий, палевий, твердої консистенції; ІГЕ-3а – суглинок лесовий, твердої консистенції (зсувні накопичення); ІГЕ-4 – суглинок лесовидний, тяжкий, твердої консистенції; ІГЕ-4а – суглинок лесовидний, бурий, твердої консистенції (зсувні накопичення); ІГЕ-5 – суглинок (супісок) лесовий, легкий, твердої консистенції; ІГЕ-5а – суглинок лесовий, палевий, твердої консистенції (зсувні накопичення); ІГЕ-6 – суглинок тяжкий, напівтвердої консистенції із включеннями гіпсу; ІГЕ-6а – суглинок тяжкий, твердої консистенції (зсувні накопичення); ІГЕ-7 – глина легка, твердої консистенції; ІГЕ-7а – глина легка, твердої консистенції (зсувні накопичення); ІГЕ-8 – вапняк-черепашник, в покрівлі «плитчастий», перекристалізований; ІГЕ-9 – глина сіра, з лінзами супіску, легка, твердої консистенції; ІГЕ-9а – глина сіра з лінзами супіску, легка, напівтвердої консистенції (зсувні накопичення); ІГЕ-10 – супісок сірий, пластичної консистенції; ІГЕ-10а – супісок сірий, пластичної консистенції (зсувні накопичення).

Лесовидні суглинки (ІГЕ-2 і ІГЕ-4) мають просадні властивості. Ґрунти, що складають зсувний схил (ІГЕ-3а÷ІГЕ-5а) характеризуються як просідаючі до рівня ґрунтових вод (РГВ).

Гідрогелогічні умови майданчика характеризуються розвитком трьох водоносних горизонтів. Перший від поверхні безнапірний водоносний горизонт відзначений на глибині 14,3÷15,5 м (абс. позначки 29,80÷31,80 м). Другий водоносний горизонт, який залягає на абсолютних позначках 5,35÷8,10 м є також безнапірним. Третій напірний водоносний горизонт залягає на глибинах 0,6÷25,2 м (абс. позначка -1,4÷9,55 м).

Раніше на цій ділянці відбувалися глибокі блокові зсуви видавлювання з деформацією поверхні меотичних глин та поверхнею зсуву, що розташована нижче за сучасний рівень моря. У рельєфі поверхні схилу простежуються зсувні ступені, які розділені глибокими тріщинами. Зсувні зміщення першого порядку на даній ділянці узбережжя були відзначені в 1856, 1858 і 1963 роках. Після цього, в період з 1966р. по 1972р., для підвищення стійкості схилу були проведені протизсувні заходи, що полягали в будівництві морських берегоукріплювальних споруд (хвилеломів, траверс, бун, підпірних та хвилевідбійних стінок), підземних і надземних дренажних споруд схилів (галерей, штолень, свердловин-фільтрів, водовідвідних каналів), наживі пляжів. В даний час відзначається активна абразійна діяльність моря, яка негативно впливає на загальну стійкість схилу.

У якості вихідних даних для розрахунків стійкості, прийняті дані інженерно-геологічних вишукувань [13]. Інженерно-геологічна будова схилу показана для розрізу 1-1 (рис. 1), який відноситься до найбільш небезпечної частини схилу. Перехід від опису природних інженерно-геологічних умов до розрахункової схеми був виконаний шляхом схематизації меж ІГЕ та потужності шарів ґрунту порушеної структури.

Схил, який розглядається, відноситься до зсувонебезпечного [14]. Клас наслідків (відповідальності) споруди прийнятий СС2. Нормативний коефіцієнт запасу стійкості при основному сполученні навантажень прийнятий рівним 1,20, а при аварійному – 1,15.

Навантаження і впливи, прийняті для розрахунків стійкості схилу, відповідають вимогам нормативних документів ДБН В.1.1-46:2017 [14] та ДБН В.1.1-12:2014 [15].

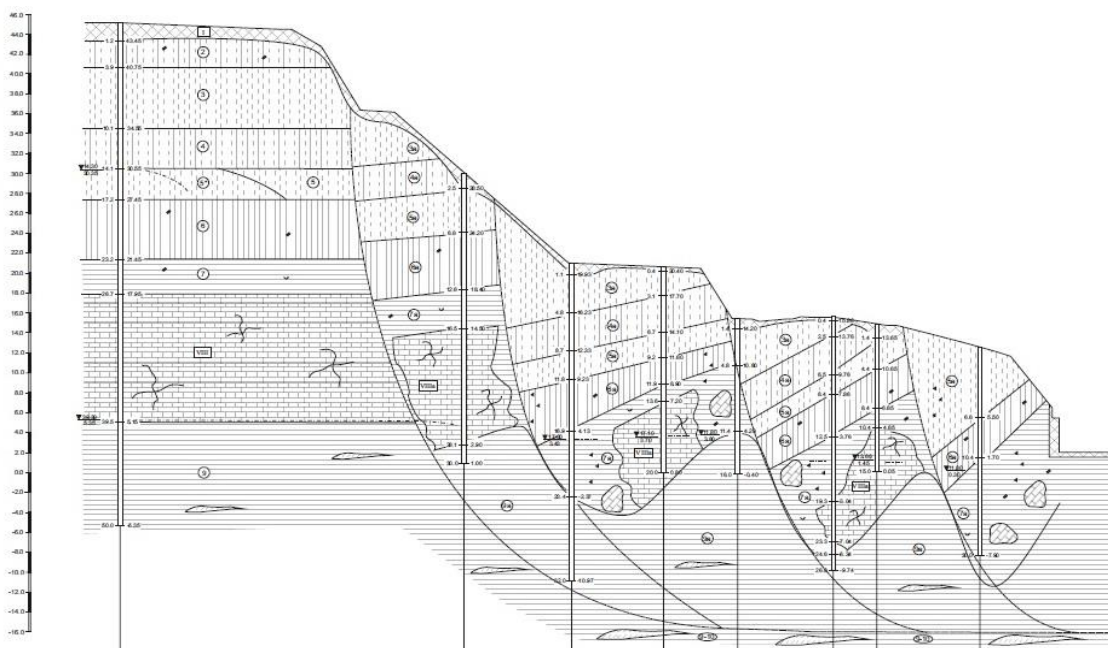


Рис. 1. Розрахунковий інженерно-геологічний розріз 1-1

Розрахунки стійкості схилу виконані у двовимірній (плоскій) постановці, методами Бішопа [16] та Янбу [17] за фіксованими кривими ковзання, в програмному комплексі «Slide», версія 6.0. В розрахунковій схемі враховувались фізико-механічні характеристики ґрунтів, сили гідродинамічного впливу ґрунтового потоку, сейсмічний вплив інтенсивністю 7 балів. Розрахунок за фіксованими площинами ковзання передбачає, що ця поверхня ковзання (положення і обрис) вже встановлена хоча б на частині її простягання. На невідомій частині поверхня ковзання встановлюється методом підбору. В умовах плоскої задачі ця криволінійна поверхня ковзання з деяким наближенням може бути замінена в площині креслення тією чи іншою сукупністю прямих ліній – ліній ковзання. Результати розрахунку загальної стійкості схилу за трьома розрахунковими створами представлені на рис. 2, а значення коефіцієнтів запасу стійкості зведені в таблицю 1.

Таблиця 1 – Значення мінімальних коефіцієнтів загальної стійкості

№ інженерно-геологічного розрізу	Розрахункові значення коефіцієнтів запасу стійкості, k_{st}			
	основне сполучення навантажень		аварійне сполучення навантажень	
	метод Бішопа	метод Янбу	метод Бішопа	метод Янбу
1-1	1,09	1,12	0,97	0,99
2-2	1,10	1,13	0,99	1,01
3-3	1,38	1,41	1,19	1,21

За отриманими результатами розрахунків стійкості схилу відмічено, що загальна стійкість схилу забезпечена лише для розрізу 3-3. Мінімальний коефіцієнт запасу стійкості для основного сполучення навантажень складає $k_{st} = 1,38$, що більше нормативного значення $k_{sn} = 1,20$ (для класу наслідків СС2). Коефіцієнт запасу стійкості для аварійного сполучення навантажень складає $k_{st} = 1,19$, при нормативному значенні $k_{sn} = 1,15$. Отримані коефіцієнти запасу стійкості для розрізів 1-1 та 2-2 свідчать про те, що нормативна стійкість схилу не забезпечена. Ґрунтовий масив знаходиться в стані нестійкої рівноваги та при впливі природних або техногенних факторів можуть активізуватись зсувні деформації.

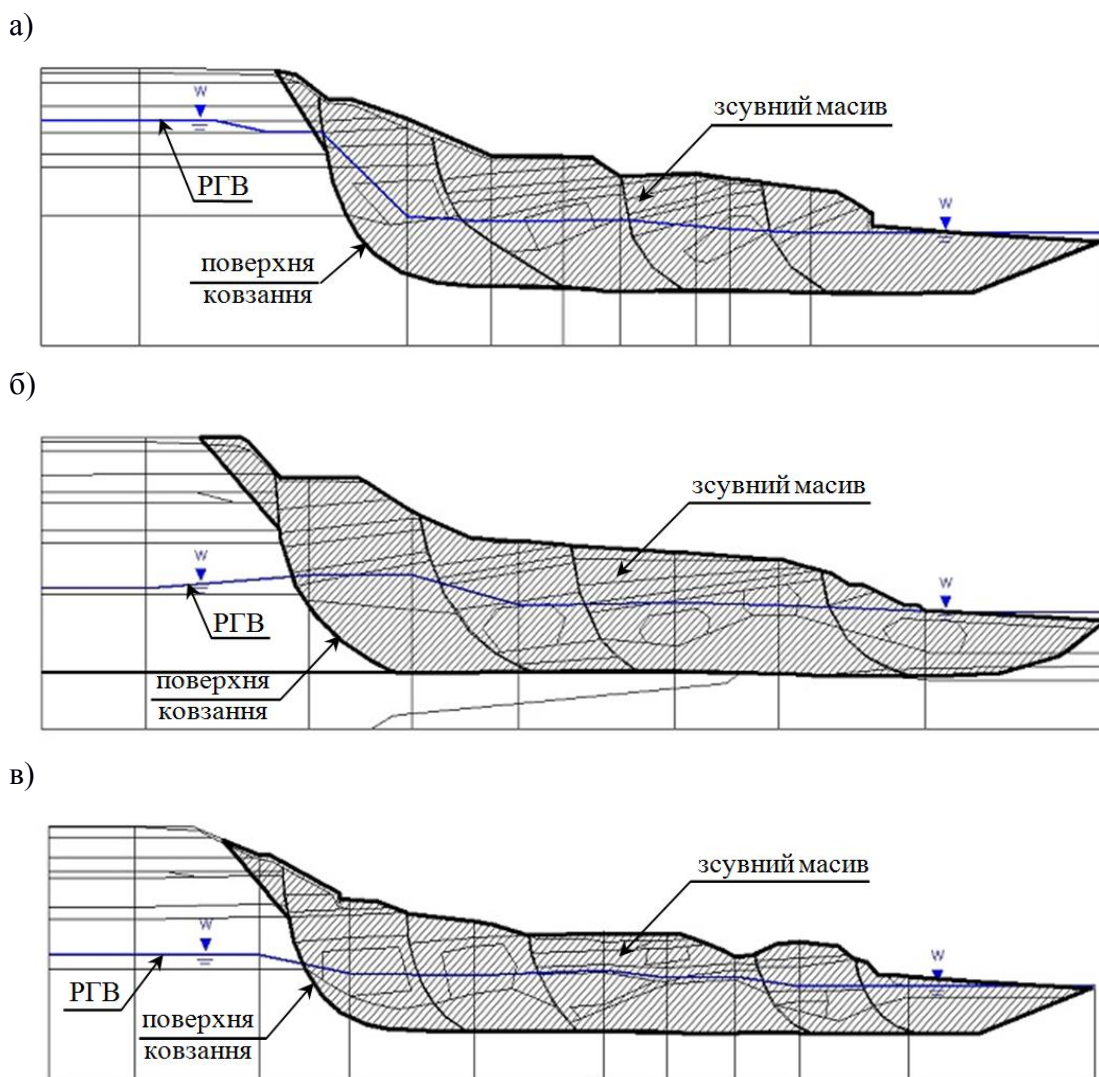


Рис. 2. Загальний вигляд зсувного тіла:
 а – розрахунковий розріз 1-1; б – розрахунковий розріз 2-2;
 в – розрахунковий розріз 3-3

Враховуючи складність інженерно-геологічної будови ділянки схилу, розрахунки стійкості виконувались також в тривимірній постановці. Розрахунки в тривимірній постановці дають результати, наближені до реальності, на відміну від результатів, отриманих загальноприйнятими і поширеними інженерними методами за двовимірними схемами. Це пояснюється тим, що тривимірна постановка завдання враховує комбінації інженерно-геологічних умов всього схилу та дозволяє враховувати фактори, що істотно впливають на стійкість (особливості топографії; наявність підрізування схилу, ярів, точкових будівельних конструкцій тощо). Однією з важливих переваг просторової оцінки стійкості укосів є те, що такий розрахунок дозволяє прогнозувати розвиток зсувного процесу не тільки по глибині досліджуваного розрізу ґрунтового масиву, але і в плані [12].

Оцінка стійкості схилу у тривимірній постановці виконана із застосуванням розрахункової програми Midas GTS NX. Розрахунки НДС схилу виконувалися методом МСЕ, з визначенням коефіцієнту запасу стійкості методом редукції по моделі Мора-Кулона. В основі методу редукції лежить послідовне пропорційне одночасне зниження (збільшення) міцності (питомого зчеплення і тангенса кута внутрішнього тертя ґрунту) і перерахунок НДС масиву.

Тривимірний розрахунковий схематичний розріз створено за трьома інженерно-геологічними розрізами (1-1, 2-2, 3-3) [13]. В розрахунок була врахована топографія схилу, різноманітність ґрунтів, визначених в межах проведення геологічних вишукувань, зміна рівня ґрунтових вод по всій

довжині схилу. Загальний вигляд тривимірної розрахункової схеми існуючого схилу представлений на рис. 3.

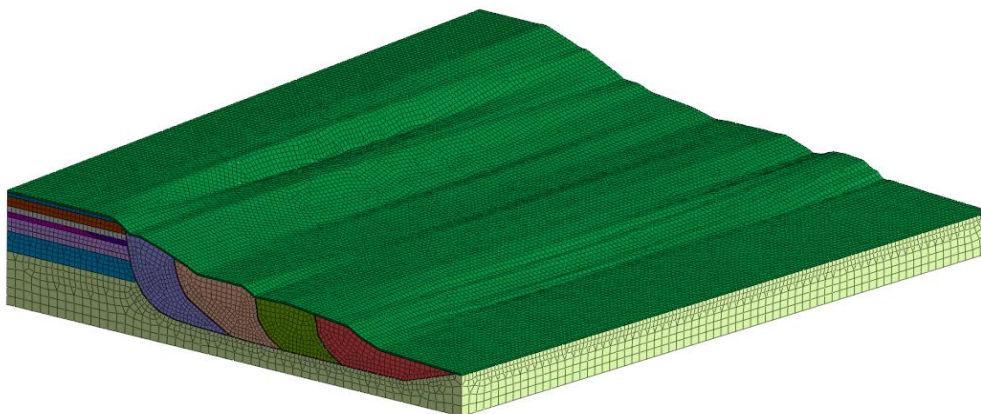


Рис. 3. Загальний вигляд тривимірної розрахункової схеми схилу

В результаті розрахунку НДС схилу, були виявлені зони максимальних дотичних напружень (рис. 4) по ґрунту порушеної структури (міцнісні характеристики ґрунту визначені, як «плашка по плашці») і значення коефіцієнта запасу стійкості, отриманого методом редукції.

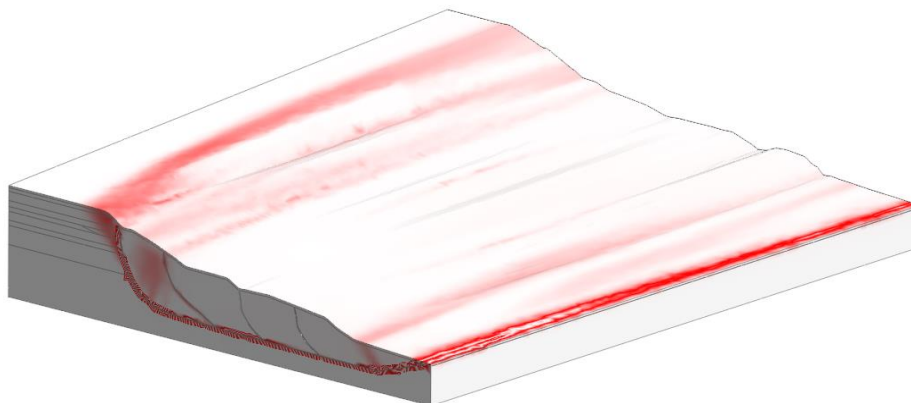


Рис. 4. Зони максимальних дотичних напружень схилу

Розрахунковий коефіцієнт запасу стійкості схилу при основному сполученні навантажень становить $k_{st} = 1,17$, при нормативному значенні $k_{sn} = 1,20$. Загальна стійкість розглянутого схилу не забезпечена, схил знаходиться в стані нестійкої рівноваги. При впливі природних або техногенних факторів можуть активізуватись зсувні деформації.

З ціллю забезпечення нормативної стійкості схилу необхідно передбачити влаштування протизсувних (утримуючих) споруд. В якості протизсувних споруд можуть бути застосовані утримуючі пальові конструкції з кількох рядів залізобетонних бурових паль з ростверком, паль-шпонок або контрфорсні конструкції (поздовжні стіни, барети).

Висновки. За результатами аналізу інженерно-геологічних і гідрогеологічних умов схилу, а також оцінки результатів розрахунків стійкості зроблені наступні висновки:

1. Загальна стійкість схилу для розрізу 1-1, при основному сполученні навантажень, не забезпечена з мінімальним коефіцієнтом запасу стійкості $k_{st} = 1,09$, при нормативному значенні $k_{sn} = 1,20$. Коефіцієнт запасу стійкості для аварійного сполучення навантажень складає $k_{st} = 0,97$, при нормативному значенні $k_{sn} = 1,15$.

2. Загальна стійкість схилу для розрізу 2-2, при основному сполученні навантажень, не забезпечена з мінімальним коефіцієнтом запасу стійкості $k_{st} = 1,10$, при нормативному значенні $k_{sn} = 1,20$. Коефіцієнт запасу стійкості для аварійного сполучення навантажень складає $k_{st} = 0,99$, при нормативному значенні $k_{sn} = 1,15$.

3. Загальна стійкість схилу для розрізу 3-3, при основному сполученні навантажень, забезпечена з мінімальним коефіцієнтом запасу стійкості $k_{st} = 1,38$, при нормативному значенні $k_{sn} = 1,20$. Коефіцієнт запасу стійкості для аварійного сполучення навантажень складає $k_{st} = 1,19$, при нормативному значенні $k_{sn} = 1,15$.

4. Загальна стійкість схилу в тривимірній постановці, при основному сполученні навантажень, не забезпечена з мінімальним коефіцієнтом запасу стійкості $k_{st} = 1,17$, при нормативному значенні $k_{sn} = 1,20$.

5. Отримані результати свідчать про те, що схил знаходиться в стані нестійкої рівноваги. При впливі природних або техногенних факторів можуть активізуватись зсувні деформації. Для забезпечення нормативної стійкості схилу необхідно влаштувати протизсувні споруди.

6. Оскільки під поверхнею ковзання залягає досить міцний підстилаючий шар (ІГЕ 9), в якості протизсувних споруд можуть бути застосовані утримуючі пальові конструкції з кількох рядів залізобетонних бурових паль з ростверком або паль-шпонок. В якості альтернативного варіанту конструкції утримуючої споруди можуть розглядатись пальово-контрфорсні конструкції (поздовжні стіни або барети). При цьому запропоновані конструкції можуть поєднуватись з фундаментами будівель та споруд.

7. Вибір типу протизсувних споруд, їх розташування на схилі, кількість, конструктивні розміри залежать від величини зсувного тиску та виконується за результатами розрахунків стійкості схилу.

8. З метою уточнення стану схилу (зсувний або зсувонебезпечний) необхідно виконати зсувну зйомку, встановити марки та ґрунтові репера на схилі та проводити моніторинг даної території.

9. Враховуючи складність геологічної будови схилу та утворення раніше на цій ділянці глибоких блокових зсувів видавлювання, для будівельного освоєння схилу та інженерної підготовки території необхідно виконати візуальне обстеження, моніторинг ділянки схилу і додаткові інженерно-геологічні вишукування під конкретні будівельні майданчики.

10. Після уточнення інженерно-геологічних умов має бути створена тривимірна розрахункова схема з урахуванням результатів виконаної оцінки стійкості, візуального обстеження, моніторингу ділянки схилу та конструкції будівлі, яка проектується.

11. Необхідно виконати планувальні роботи поверхні схилу та влаштувати дренажні пристрої для зниження рівня ґрунтових вод в зсувних накопиченнях, що збільшить загальну стійкість схилу.

Література

1. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП. К.: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України». 2020. Вип. XVII. 104 с.

2. Синцов И.Ф. Об Одесских оползнях и о причинах их происхождения. *Записки Новороссийского общества естествоиспытателей*. Одесса, Т. XXII, Вып. I, 1898. С. 187-241.

3. Дранников А.М. Генеральная схема противооползневых мероприятий побережья г. Одессы. Одесский облисполком. Бюро проектирования противооползневых мероприятий. Одесса, 1940. 190 с.

4. Труды Одесского государственного университета им. И.И. Мечникова. Материалы по изучению Одесских оползней. Одесса, Т. 150, Вып. 7, 1960. 159 с.

5. Яцько І.Я. Зсувні явища на одеському узбережжі Чорного моря. *Вісник метеорології та гідрології*. 1938. № 3-4. С. 43-60.

6. Зелинский И.П., Корженевский Б.А., Черкез Е.А. и др. Оползни северо-западного побережья Черного моря: их изучение и прогноз: монография. Київ: Наукова думка, 1993. 227 с.

7. Зелинский И.П. Теоретические и методические основы моделирования оползней: автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Москва, 1979. 43 с.

8. Черкез Е.А. Оползни северо-западного побережья Черного моря: моделирование, прогноз устойчивости склонов и оценка эффективности противооползневых мероприятий:

автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук: 04.00.07. Одесса, 1994. 36 с.

9. Гришин В.А., Снисаренко В.И. Одесские склоны и оползни: монография. Киев: МП "Леся", 2008. 300 с.

10. Гришин В.А., Гришин А.В. Математическое моделирование оползневых процессов при сейсмических воздействиях. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. Вип. 55. С. 79-85.

11. Гришин В.А., Дорофеев В.С., Мартынов Г.А. Расчет склонов одесского побережья. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2010. Вип. 38. С. 184-194.

12. Великий Д.І. Стійкість ґрунтових споруд з урахуванням просторового ефекту: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Одеса, 2021. 171 с.

13. Заключение об инженерно-геологических изысканиях для расчета устойчивости склона по объекту «Строительство многопрофильного курортного комплекса с апарт-отелем по адресу: г.Одесса, Французский бульвар, 85, 85/1», Одесса, 2019. 35 с.

14. ДБН В 1.1-46:2017. Инженерный захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2017. 43 с.

15. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 110 с.

16. Bishop A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique*. 1955. № 5. P. 7-17.

17. Janbu N. Slope stability computation. *Embankment–Dam Engineering*. Casagrande volume. 1973. P. 47-86.

References

- [1] *Informatsiynyi shchorichnik shchodo aktivizatsii nebezpechnik ekzogennikh geologichnikh protsesiv za danimi monitoringu EGP*, К., Derzhavna sluzhba geologii ta nadr Ukraïni, Derzhavne naukovo-virobniche pidpriemstvo «Derzhavniy informatsiynyi geologichniy fond Ukraïni», vol. XVII, 2020.
- [2] I.F. Sintsov, "Ob Odesskih opolznyah i o prichinah ih proishozhdeniya", *Zapiski Novorossijskogo obshchestva estestvoispytatelej*. Odessa, T. XXII, vol. I, 1898, pp. 187-241.
- [3] А.М. Drannikov, *Generalnaya skhema protivopolznykh meropriyatiy poberezhia g. Odessy*. Odesskiy oblispolkom. Byuro proyektirovaniya protivopolznykh meropriyatiy, Odessa, 1940.
- [4] *Trudy Odesskogo gosudarstvennogo universiteta im. I.I. Mechnikova*, Materialy po izucheniyu Odesskikh opolzney, Odessa, T. 150, vol. 7, 1960.
- [5] I.Ya. Yats'ko, "Zsuvni yavlyshcha na odeskomu uzberezhzhi Chomoho moray", *Visnik meteorologii ta gidrologii*, no. 3-4, pp. 43-60, 1938.
- [6] I.P. Zelinskii, B.A. Korzhenevsky, E.A. Cherkez i dr., *Opolzni severo-zapadnogo poberezhia Chernogo morya: ikh izucheniye i prognoz*: monografiya. Kiïv: Naukova dumka, 1993.
- [7] I.P. Zelinskii, "Teoreticheskiye i metodicheskiye osnovy modelirovaniya opolzney", avtoref. dis. ... dokt. geol.-min. nauk, Moskva, 1979.
- [8] E.A. Cherkez, "Opolzni severo-zapadnogo poberezhia Chernogo morya: modelirovaniye. prognoz ustoychivosti sklonov i otsenka effektivnosti protivopolznykh meropriyatiy", avtoref. dis. ... dokt. geol.-min. nauk: 04.00.07, Odes'ka derzhavna akademiya budivnictva ta arhitekturi, 1994.
- [9] V.A. Grishin, V.I. Snisarenko, *Odesskiye sklony i opolzni*: monografiya. Kiïv: MP "Lesya", 2008.
- [10] V.A. Grishin, A.V. Grishin, "Matematicheskoye modelirovaniye opolznykh protsessov pri seysmicheskikh vozdeystviyakh", *Visnyk Odes'koyi Derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury*, vol. 55, pp. 79-85, 2014.
- [11] V.A. Grishin, V.S. Dorofeev, A.G. Martynov, "Raschet sklonov odesskoho poberezhia", *Visnyk Odes'koyi Derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury*, vol. 38, pp. 184-194, 2010.

- [12] D.I. Velykiy, "Stijkist gruntovih sporud z urahuvannyam prostorovogo efektu", dis. ... kand. tehn. nauk: 05.23.01, Odes'ka derzhavna akademiya budivnictva ta arhitekturi, 2021.
- [13] Zaklyuchenie ob inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyah dlya rascheta ustojchivosti sklona po obektu «Stroitelstvo mnogoprofilnogo kurortnogo kompleksa s apart-otelem po adresu: g. Odessa, Francuzskij bulvar, 85, 85/1», Odessa, 2019.
- [14] DBN V 1.1-46:2017. Inzhenernij zahist teritorij, budivel i sporud vid zsuviv ta obvaliv. Osnovni polozhennya. Kiyiv: Minregionbud Ukrayini, 2017.
- [15] DBN V.1.1-12:2014. Budivnictvo u sejsmichnih rajonah Ukrayini. Kiyiv: Minregionbud Ukrayini, 2014.
- [16] A.W. Bishop, "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", *Géotechnique*. no. 5, pp. 7-17, 1955.
- [17] N. Janbu, "Slope stability computation", *Embankment–Dam Engineering*, Casagtande volume, 1973, pp. 47-86.

ASSESSMENT OF THE STABILITY OF THE SLOPE SECTION OF THE ODESSA COAST

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

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

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

Abstract. Currently, there is a reduction in sites convenient for the construction of facilities. In this regard, the question of the development of new territories that were previously considered unsuitable or economically unprofitable for construction is increasingly being raised. Very often it is necessary to build buildings and structures on or near slopes. The development of landslide and landslide-prone slopes requires a comprehensive study, the results of which should be used in the selection of measures for the engineering protection of territories, as well as design and construction on slopes. The main task of engineers, when performing design and survey work in landslide-prone areas, is to assess the stability of the slope and the magnitude of the landslide pressure.

The article calculates the stability of the landslide-prone slope of the Odessa coast for the purpose of further construction development. The slope in question is located on the Franzysky Boulevard, in the area of the Chkalov resort. The site features are in complex engineering and geological conditions (loess soils, collapsing properties of soils, several water-bearing layers). It has been established that deep block landslides of extrusion occurred earlier in this area. After landslide control measures consisting in construction of marine coast protection and drainage structures, an increase in slope stability was observed. Despite the measures taken, there is a beach erosion with partial destruction of coast protection structures, which can lead to increased abrasion and negatively affect the stability of the entire slope.

Slope stability calculations are performed in two-dimensional and three-dimensional formulation. According to the flat schemes, calculations were performed in the Slide software package using Bishop and Janbu methods. The slope stability assessment in a three-dimensional formulation was performed by the finite element method using the Midas GTS NX calculation program and consists of determining the stress-strain state of the soil mass and the stability margin factor. Based on the calculation results obtained, the slope stability is assessed and options for landslide control (retaining) structures are proposed.

Keywords: landslide, slope, design scheme, stability margin factor, control landslide structures, boring pile, barrette.

Стаття надійшла до редакції 18.06.2022

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 **8–10 рядків**).

Текст другої анотації, якщо видання не є повністю англomовним, кожна публікація не англійською мовою супроводжується анотацією англійською мовою обсягом **не менш як 1800 знаків**. Якщо видання не є повністю українomовним, 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 № 1
вересень 2022**

Головний редактор *Вировой В.М.*

Технічний редактор *Антонюк Н.Р.*

Підписано до друку 03.10.2022 р.
Формат 60×84/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Цифровий друк. Ум.-друк. арк. 15,0.
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