

**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 № 3  
березень 2023**

***ОДЕСА 2023***

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

Випуск № 3, березень 2023

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 № 7 від 30.03.2023 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), 2023

**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 № 3  
March 2023**

***ODESSA 2023***

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

Issue № 3, March 2023

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 № 7, 30 March, 2023.*

*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), 2023

## ЗМІСТ

### АРХІТЕКТУРА

**Бабич О.М.**

Проблематика архітектури дитячих закладів інтернатного типу у вітчизняному науковому дискурсі..... 7

**Савка І.В., Гульченко С.Г., Заяць О.Я.**

Функціональні якості новітніх християнських храмів Львова..... 15

### БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

**Жданов А.А., Петров В.Н.**

Напружено-деформований стан вертикальної циліндричної металевої оболонки при температурному кліматичному впливі..... 25

**Карнаков І.А., Ковальчук В.В., Онищенко А.М.**

Оцінювання напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій труби із врахуванням її діаметру та товщини гофрованого листа..... 33

### БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

**Колесников А.В., Семенова С.В., Вировой В.М., Олійник Т.П.**

Будівельні композити як об'єкти системного аналізу..... 41

**Цапко Ю.В., Бондаренко О.П., Цапко О.Ю., Горбачова О.Ю., Мазурчук С.М., Жеребчук Д.С.**

Обґрунтування ефективності спучуючого покриття для вогнезахисту дерев'яних споруд.. 49

### ГІДРОТЕХНІЧНЕ ТА ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

**Онищенко А.М., Лантух-Лященко А.І., Ковальчук В.В., Карнаков І.А.**

Теоретичні засади прогнозування ресурсу конструкцій гідротехнічних споруд..... 61

**Синиця Р.В., Осадчий В.С., Дмитрієв С.В.**

Чисельне моделювання гасіння хвиль конструкцією огорожувальною гідротехнічною спорудою неповного вертикального профілю..... 77

### ІНЖЕНЕРНІ МЕРЕЖІ ТА ОБЛАДНАННЯ

**Арсирій В.А., Рябокони П.М.**

Поліпшення показників роботи котельних установок за рахунок використання прямого і зворотного циклів Ренкіна..... 90

### ОСНОВИ ТА ФУНДАМЕНТИ

**Осадчий В.С., Дмитрієв С.В., Великий Д.І., Бааджи В.Г.**

Стійкість ґрунтових споруд з урахуванням просторового ефекту..... 98

### ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

**Григоровський А.П., Броневицький А.П.**

Організаційно-технологічні особливості виконання демонтажу конструкцій пошкоджених великопанельних будинків..... 111

**Вимоги до оформлення статей у збірнику Сучасне будівництво та архітектура..... 121**

## CONTENTS

### *ARCHITECTURE*

- Babych O.M.**  
Problems of the architecture of childrens boarding-type institutions in the domestic scientific discourse..... 7
- Savka I. V., Gulchenko S. H., Zaiats O. Y.**  
Functional qualities of Iviv's newest christian churches..... 15

### *BUILDING STRUCTURES*

- Zhdanov A.A., Petrov V.N.**  
Stress-deformed state of vertical cilindrical metal shell under temperature climate impact..... 25
- Karnakov I., Kovalchuk V., Onyshchenko A.**  
Assessment of the state of stress and deformation of metal corrugated pipe structures taking into account its diameter and thicknesses of the corrugated sheet..... 33

### *BUILDING MATERIALS AND TECHNIQUES*

- Kolesnykov A.V., Semenova S.V., Vyrovoy V.M., Oliinyk T.P.**  
Building composites as objects of system analysis..... 41
- Tsapko Yu., Bondarenko O., Tsapko A., Gorbachova A.Yu., Mazurchuk S.N., Zherebchuk D.**  
Justification of the efficiency of floating coating for fire protection of wooden buildings..... 49

### *HYDROTECHNICAL AND TRANSPORT CONSTRUCTION*

- Onyshchenko A., Lantoukh-Liaschenko A., Kovalchuk V., Karnakov I.**  
Theoretical foundations of forecasting the resource of hydraulic structures..... 61
- Synytsia R.V., Osadchiy V.S., Dmytriiev S.V.**  
Numerical simulation of wave dampening by a structure of the hydro-engineering facility in complete vertical profile..... 77

### *UTILITY NETWORKS AND FACILITIES*

- Arsirii V.A., Ryabokon P.M.**  
Improving the performance of boiler plants due to the use of direct and reverse Rankin cycles 90

### *BASEMENT AND FOUNDATIONS*

- Osadchy V.S., DmytrievS.V., VelykyiD.I., Baadzhi V.G.**  
Stability of earth structures taking into account the spatial effect..... 98

### *TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF BUILDING PRODUCTION*

- Grigorovskyi A.P., Bronevytskyi A.P.**  
Organizational and technological features of dismantling structures of damaged large-panel buildings..... 111
- Requirements for the articles formation in collection Modern construction and architecture 121**

**PROBLEMS OF THE ARCHITECTURE OF CHILDREN BOARDING-TYPE INSTITUTIONS IN THE DOMESTIC SCIENTIFIC DISCOURSE**

**Babych O.M.**, graduate student,  
o.krokhtiak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2377-5891  
*Lviv Polytechnic National University*  
S. Bandery st., 12, 79000, Ukraine

**Abstract.** The article examines the question of rethinking the architectural qualities of a boarding-type building in the domestic discourse. The evolution of views on the main priorities of the institutions of alternative care for children is traced. Also have been determined the key role of Ukraine's adaptation of the deinstitutionalization strategy in the development of approaches to the interpretation of the residential building. Within the chronological limits of the last 30 years, have been highlighted three stages of transformation of the theoretical opinion regarding the planning and spatial structure of the care institutions. One of them is related to the inertia of functionalist approaches, the priority of which were aspects of physical health and ensuring the appropriate social level. The second stage reflects the awareness of the inadequacy of vital pragmatics and the search for different ways of influencing social adaptation and the psychology of positive interaction. At the third stage, a gradual transition to the understanding of the residential building as a small scale structure with a capacity oriented to the family type of cohabitation is noted. This opened up the prospect of a significant rethinking of the methodology of designing alternative care facilities, searching for different methods of adapting existing buildings and designing new ones on the basis that, in general, correspond to the so-called deinstitutionalization strategy adopted by Ukraine in 2017.

In connection with this, there is a question of assessing the current state of domestic scientific opinion regarding the design of residential institutions. On the basis of the methods used, it is compared with the modern understanding of the facility for alternative care in Western countries, where the strategy of deinstitutionalization has a longer history and has given certain theoretical and practical results. In general, it was established that the domestic discourse in this field, despite the relatively small number of works, corresponds to the main trends in the evolution of ideas about the care environment for orphans and children with special needs. A number of features have been identified that are characteristic of current domestic ideas in the field of care and can become the basis for our own tradition of architectural interpretation of children's residential institutions.

**Key words:** boarding school, problems, discourse, deinstitutionalization, transformation.

**Introduction.** In August 2017, Ukraine adopted the National Strategy for Reforming the System of Institutional Care and Education of Children, designed for the period until 2026. This document marked the beginning of the process of transition to a new concept of care for children deprived of parental care. Research in the field of children's behavior and personality development has shown that there is a serious lag in the development of children who are brought up in so-called institutional institutions of the traditional type [1]. Therefore, there was a need to search for a new format for a residential institution, both in the sense of a pedagogical and an architectural and design organization. The emergence of the mentioned strategy in Ukraine shows that, in general, the country is aware of the existing challenges at the intellectual level and is ready for significant reform, which will require significant efforts and resources. An additional circumstance that actualizes the topic of development and improvement of residential institutions for children is the significant social changes associated with the consequences of the Russian military invasion in 2022, which significantly increased the number of orphans and children with special needs. The static nature of the field of alternative care, which was associated with objective circumstances,

should be changed to an active search for effective ways of organizing care spaces based on deinstitutionalization and the use of modern developments in the field of psychological adaptation and socialization of children left without parental care. In this regard, the domestic research base needs to be studied and systematized, as well as a comprehensive assessment from the point of view of a) cost for the purposes of practical implementation of the strategy of deinstitutionalization transformation, the possibilities of involving certain theoretical developments in the design of new-type residential complexes; b) its comparison with similar discourses in other countries, especially those where deinstitutionalization processes already have a certain tradition and corresponding analytical reflection. Thus, the preliminary hypothesis of the study arose from the fact that in Ukraine there is a specific situation in the design of alternative care facilities, which is formed by three factors: a) the inertia of the intuitive tradition; b) a sudden increase in the need for residential institutions, which is connected with the consequences of the Russian military invasion of Ukraine; c) a rapid change in the paradigm of caring for orphans based on modern research in this field.

**Analysis of recent research and publications.** In the domestic discourse, since the 1990s, it is possible to note the interest in the topic of residential institutions for children deprived of parental care. In particular, as early as 1993, O. Dorozhkina's dissertation appeared on the peculiarities of the treatment of children in boarding schools [2]. In 2001, M. Komisaryk published a work devoted to the use of phytoclimate in the rehabilitation and preventive work of orphanages [3]. Architectural problems are considered in A. Arkhaimova's dissertation "Principles of architectural and planning solutions of social rehabilitation centers (for homeless children and adolescents)" [4]. In the next decade, interest in more detailed aspects of the problem and the need to revise the "institutional" model of residential institutions and their architecture is manifested. In this context, we can note the works of L. Gnes [5], N. Myroshnikov and Y. Doroshenko [6], P. Sankov, S. Tkach and A. Podolinny [7], V. Abyzova and O. Voloshchenko [8] and A. Kimnaz [9]. The latest works examine this problem through the prism of new achievements in the field of treatment of orphans, with an emphasis on the problems of socialization and individualization, a person-oriented approach. Such studies include the works of A. Koval-Tsepova [10] and Z. Obitochnaya [11].

**The purpose of the article** is to study and evaluate the current state of research on the peculiarities of the architecture of boarding-type children's institutions in the domestic scientific discourse.

**Research objectives:** 1) trace the stages of development of the national scientific discourse in the field of boarding school architecture and outline their main characteristics; 2) outline its features and specificity, including in comparison with similar discourses in other countries, especially those where deinstitutionalization processes already have a certain tradition and corresponding analytical reflection.

**Research materials and methodology.** The issue of the architecture of alternative care institutions for children is an urgent direction of the development of domestic science, both given historical reasons and modern challenges associated with the Russian military invasion of Ukraine. In the context of the former, it is necessary to note the significant legacy of the "institutional" concept of treatment of orphans and children with special needs, which has a complex nature and concerns both pedagogical and educational techniques and their spatial solution. This state, at one time, became the starting point in the transformation of ideas about the architecture of care institutions in the domestic discourse during the 1990s. An example can be O. Dorozhkina's dissertation "Formation of the need for aesthetic activity in pupils of orphanages and boarding schools" from 1993 [2]. In the study, the problem is considered more generally, and certain aspects of the functioning of residential institutions are interpreted in the spirit of the modernist industrial worldview. Despite this, certain specific features are also noticeable in the dissertation, which indicates that the "functionalist" approaches, traditional for the Soviet era, are beginning to be rethought. The author focuses on the category of creativity, as one of the key means of solving the main problem – the formation of an individual within the positive framework of self-esteem and socialization. It is possible to note the style and methodological approach characteristic of the post-Soviet scientific school, avoiding the "mechanical" perception of children only from the point of

view of their welcome, not psychological and communicative needs. The further progress of domestic scientific thought in the field of architecture of care institutions is connected with rethinking the space and supplementing its welcome priorities with developmental and cognitive elements. In this sense, it is possible to note, for example, the study by M. Komisaryk "Pedagogical conditions for the use of paleoclimate in the rehabilitation and preventive work of orphanages for orphans" [3]. Here, the subject of personal orientation education is developing, which is carried out through the mechanisms of involving elements of photo design in deciding the interior design of residential institutions. In the work, with the help of several arguments, the important role of micro landscape zones in the psychological regulation of children who are in a care institution is asserted, primarily it is about the negative effect of developmental delay due to alienation from the family format of the environment of growth. It is worth noting that the author draws her conclusions at a time when the ideology of "deinstitutionalization" had not yet gained popularity, and studies that showed the need to revise the treatment of children deprived of parental care in special institutions had not been conducted. In addition to the theoretical part, the research also has a practical component, which is related to the specifics of landscaped areas in the interior. In this sense, we can talk about the development of certain pedagogical techniques and practices related to the arrangement of caring spaces. The result of the study is the experience of working with the modeling of various formats of overcoming alienation and seclusion, due to the use of architectural and design methods of using micro-landscape gardening, which, in turn, testifies to one's original search for ways to transform the architecture of children's boarding schools in the domestic discourse.

The further development of this topic is connected with the reception and development of the deinstitutionalization strategy. In this context, it is worth mentioning the dissertation work of A. Arkhaimova "Principles of architectural and planning solutions of social rehabilitation centers (for homeless children and adolescents)" [4]. Although the work was performed at a time when the values of deinstitutionalization were just beginning to spread in the Ukrainian scientific and educational space, the research is already distinguished by a rather deep understanding of the basics of the problem and the author's understanding of the actual tasks of transforming ideas about the architecture of care institutions. The author outlines three types of this type of facility – a consultation center, a crisis center, and social patronage. Worthy of attention is the understanding of the modern character of the residential building, which is seen as having the qualities of dynamism and changeability. In this regard, the main architectural tasks have been defined, which should help align the institution of alternative care with modern ideas about the growth of a child in special conditions. Such principles as openness to the environment, self-sufficiency, and social orientation are distinguished, as well as the participatory principle of organizing a common living space. Special attention is devoted to measures to create "family" and communicative camaraderie.

In a certain sense, it can be said that A. Arkhaimova's dissertation is a kind of intermediate link that combines two fundamental concepts of the architecture of care institutions for children deprived of parental care. Already at this time (2005), the inadequacy and harmfulness of current types of residential buildings, their functional rigidity, and visual dehumanization were determined. On the other hand, the author suggests a gradual transition to the new principles of the architecture of boarding facilities. Old buildings can continue to exist, however, However, on the other hand, there is an opinion about the need to improve the care space, in fact, within the existing worldview principles, regarding the stay of a child in such institutions.

The work performed at such a time, for obvious reasons, could not unequivocally abandon the experience and heritage of "institutional" objects. Here, rather, we can talk about the intuition of the necessary direction of their changes, which generally corresponded to advanced Western experience in this area. It is worth noting that ten years before the publication of the results of the research on the harmful effects of children's stay in institutional institutions, the author combines many valuable ideas with their transformation precisely in the direction of family orientation and "family", which corresponds to those measures that will be kept in the future to avoid defects of the institutional system.

Also worthy of attention is the idea of children of different age groups living together. The content of such distribution is to form social responsibility and inclusiveness by assimilating guardianship functions by older children relative to younger ones and thus achieving greater personal attention focused on each child. Therefore, a kind of new "family collectives" are formed, which transmit the appropriate atmosphere from one generation to another. In addition, it is worth noting the vision of care institutions as mobile institutions that can be temporary and solve certain tasks related to unforeseen circumstances, or reflect certain specific circumstances of a particular local context. In addition, various mobile care facilities are likely to be able to provide services to more children. This is becoming especially relevant now when in connection with the Russian invasion, a large number of temporarily displaced people appeared in Ukraine, there were changes in the family structure – mainly in connection with the departure of a part of the family abroad, etc.

In the future, it is possible to note the strengthening of the positions of the values of deinstitutionalization in the understanding of the actual tasks of the architecture of alternative care institutions for children. In this regard, it is worth noting the small in scope, but rich in content work of L. Gnes "Architectural and planning organization of family-type children's homes" in 2010 [5]. Here, the author briefly outlines the shortcomings of the traditional system of treatment of children in care homes and also considers the prospects for further progress in the framework of psychological and social adaptation. The methodology is based on the description, which made it possible to identify the main problems of "institutional" institutions and outline the range of measures for their improvement. The article distinguishes two types of environment – individual and collective. The effectiveness of children's growth is imagined as a search for a balance in these two spaces. In this case, architecture deals with the spatial materialization of complex concepts of growth aimed at increasing the individualization of the individual and its positive interaction with the surrounding social environment. Spaces for collective interaction have a complex nature and are intended for both traditional functions (eating, educational activities, etc.) and those aimed at revealing the child's personal qualities (various types of creativity, cognitive leisure, etc.).

Processes of commercial subjectivization of residential functions are a separate important topic characteristic of the domestic discourse on childcare institutions. During the period of Independence, a process of diffusion and complication in the field of care took place due to the emergence of various private and social initiatives, which largely developed in a chamber format by adapting premises originally planned for other purposes. In particular (and in the vast majority) these were multi-room apartments in residential buildings, in which, thanks to a change in design, care functions were incorporated. The positive side of this process was the decrease in the number of children in one institution, which is one of the main signs of a "deinstitutionalized" institution. However, according to the author's observation, such placement in a dense urban environment seriously complicates the formation of an effective space for child care, the priorities of which are personal-oriented development. The paper presents arguments that the most effective solution for a modern boarding-type institution is a single-family house in a suburban environment, in which planning techniques should be applied, the need for which emerges from the data obtained as a result of a questionnaire survey. Therefore, the work of L. Hnes, although not large in scope, contains important practical results and is an example of his reflection on the problems of the architecture of alternative care institutions in the domestic scientific environment.

Detailing and deepening of the national discourse around the topic of the architecture of care spaces for children deprived of parental care can be seen in the research article of Y. Doroshenko and N. Myroshnikov "Houses for the education of orphans: a retrospective and typology of care institutions" of 2015 [6]. The basis of the work is the structuring of four types of boarding-type institutions – a children's home, an orphanage, a boarding school, and a family-type orphanage. Considerable attention is paid to the principles of balancing between welcoming and personal aspects of the child's growth process. Thus, without directly mentioning the deinstitutionalization strategy, its main principles and values are objectively present here.

A rather ambitious goal was set in the 2016 article by P. Sankov, S. Tkach, and A. Podolinny "Methodology for the formation of houses – boarding schools for the social adaptation of preschool

and school-age children", which consists in "creating new methods of organizing boarding facilities" [7]. As a basis, the authors take the assessment of various designs of boarding houses in such countries as Great Britain, China, the USA, Germany, and others. Judging from the text, the authors do not yet rely on the deinstitutionalization strategy as an already formed programmatic phenomenon in their methodology and conclusions. The content of the material unequivocally indicates the feeling of the need for the development of a "chamber" and "family" in the organization of care space for children deprived of parental care. A significant amount of the material is an analysis of various methods of neutralizing the mechanical and deindividuating reality of traditional residential institutions. The work focuses on the examples discussed in the article, illustrating various architectural methods that give the environment emotional sensitivity and contribute to the individualization of personal perception by exhibiting active visual markers open to multifaceted perception.

The development of similar developments can be noted in the 2018 work of V. Abyzov and R. Voloshchenko "Formation of the subject-spatial environment of children's shelters", which focuses on slightly different aspects of the architecture of care [8]. In a relatively small volume of work, the authors focus on the importance of the internal spaces of residential institutions. The inconsistency of the "barracks" planning and spatial design method for the strategy of humanization and deinstitutionalization, the implementation of which requires complex work in several fields, is emphasized. They emphasize the objective obsolescence of the "barracks" type of residential institutions, and much attention is paid to the need to find different ways of implementing programs of psychological rehabilitation and personal growth, which are needed by children left without parental care, to create an environment of positive perception of the environment and their personality. In this sense, the authors turn to such areas as the scientifically based use of color, develop the subject of mental integration into the inner space of micro landscape elements, etc.

The same theme was continued in the article by V. Abyzov and A. Kirnaz "Features of the formation of the space of family-type children's homes" in 2020 [9]. The authors pay attention to the practical aspects of design and set themselves the goal of laying a methodological basis for the further creation of a regulatory framework for the design of boarding facilities of a new deinstitutionalized type.

In contrast to previous explorations, which devoted a significant amount to theoretical reflection and conceptual proposals, looking for successful approaches to the actual understanding of spaces of care, here the principles of a practical recommendation program are developed. In particular, it is proposed to give preference to individual projects taking into account the specifics of one or another local base. Six schematic planning types of apartment blocks have been developed, as well as five types of apartments for the guardian-type family. The work develops the topic of recommendations for improving the emotional and communicative atmosphere within the framework of children's interaction with teachers and educators. Among them, the leading place is occupied by various design techniques. An important part of the work of V. Abyzov and A. Kirnaz became the proposals for designing children's towns oriented towards certain formats of joint stay of different age categories. By the principles of the scientific construction of the text, the authors also reveal a probable perspective regarding the directions of further work on this topic.

A. Koval-Tsepova's 2021 dissertation "Principles of Interior Design of Child Welfare Institutions" [10] can be considered a valuable contribution to the development of the architecture of care institutions. The research structure is aimed at positioning the topic in the context of the dynamic picture of changes in this area, as well as the need to involve an interdisciplinary scientific approach. The main task is the priority of overcoming the lag in the cognitive and communicative development of children who do not have direct parental care and are alienated from the family group. The author formulates her structuring of ways to solve the internal space, and also outlines a set of principles-recommendations that should be followed in the future. In general, the basis of the approach proposed in the dissertation in the formation of the caring environment remains classical artistic concepts and approaches, which only find their expression in solving specific tasks.

Since the developmental delay of children in need of alternative care is currently considered the main problem of growth in residential institutions, special attention is paid to it in the work. In this regard, three principles of environmental design were formulated, namely: authentic, game, and professional orientation. Each of them allows, as it is believed, to contribute to ensuring the necessary indicators of intellectual development. In the sense of practical value and implementation of the results, several projects are listed, which are more likely to outline directions for further improvement.

Among the innovative ideas that were voiced in the domestic discourse in the context of the evolution of the architecture of residential institutions, it is important to note certain experiments with the temporality of stay in alternative care institutions. Two levels can be noted here. On the one hand, this is the stage that precedes resettlement with a foster family (if such resettlement is possible); on the other hand, it is the time that children spend between studies in institutions of a general educational nature or the framework of involvement in other forms of traditional social interaction. Under such circumstances, the understanding of the architecture of boarding schools in a certain way changes its character, reducing attention to the stationary functional and psychological solution of the space. However, the current state of development in this direction indicates the need for further, first of all, practical experiments with spatial structures, the design of which should not be limited only to the archetypes of traditional architecture.

The most recent scientific works devoted to the architecture of residential institutions for children include the 2022 study by Z. Obitochnaya "Functional and planning organization of the center for a joint temporary stay of the elderly and orphans" [11]. The main idea is the proposal to combine alternative care facilities for children and homes for the elderly. The main argument is the complementarity of the main needs and tasks of both institutions, which can therefore work in a complementary mode and mutually cover the special problems that are characteristic of each of these types of institutions. The references to foreign experience given in the article are introductory, and the proposed concept, which can be considered a valuable contribution to the topic of the architecture of alternative care institutions, requires a long process of practical tests and gradual reflection. Probably, in the future, facts will be revealed that will testify not only to the complementarity but also to the mutual contradiction of the specifics of both institutions. The need for individualized attention, which can overlap, on the other hand, does not always coincide with the expectations in the behavioral sphere, the dynamics of the daily cycle, etc., typical for both age groups. Despite this, the very fact of the emergence of such a concept testifies to the active development of the architecture of boarding-type children's institutions in the domestic scientific discourse.

**Conclusions:**

1. Three stages of the development of the domestic scientific discourse in the field of boarding school architecture are traced, which reveal an organic transformation of priorities in the direction of distancing from the practice of "institutional" institutions and a purely functionalist-welcoming approach in interpreting the care environment. At the first stage, relative inertia is still characteristic, in which a general orientation towards a re-emphasis of attention from a collective to an individual communicative format is felt. The second stage is characterized by turning to practical methods of architectural and design organization of the environment, searching for methods of supplementing and enriching the arsenal of practical tools designed to strengthen the qualities of a person-oriented model of growth, the politicization of communicative and social adaptation. The third stage represents a more mature form of understanding the values of deinstitutionalization in the design of residential institutions. Attempts are being made to outline the framework for the regulation of alternative care institutions on a new conceptual basis.

2. The peculiarities and specifics of the domestic discourse of rethinking the architectural qualities of the boarding-type building are outlined. It is established that it contains some specific features that make it possible to talk about certain individual features; in particular, these are experiments with the following issues: a) optimization of personal development by complementing different age groups, including children and the elderly; b) flexible interpretation of the space of

care through the involvement of a wide typological spectrum of adaptable premises; c) temporality and changeability of care processes, installation of the potential of temporary and mobile bookmarks of alternative care, development of appropriate architectural and constructive solutions. Therefore, it can be asserted that the national professional discourse has gone through its path of forming the values of deinstitutionalization of alternative care institutions for children and the search for its architectural expression. The current state of development is about several promising areas that can be developed in the future and lay the foundations for the development of a new school of designing residential-type institutions.

### References

- [1] C. Nelson, N. Fox, Ch. Zeanah, *Romania's Abandoned Children Deprivation, Brain Development, and the Struggle for Recovery*. Cambridge: Harvard University Press, 2014.
- [2] O.A. Dorozhkina, "Formation of the need for aesthetic activity in children's homes and boarding schools", dis... cand. ped. nauk: 13.00.01, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 1993.
- [3] M.I. Komisaryk, "Pedagogichni umovy vykorystannia fitoklimatu v reabilitatsiino-profilaktychnii roboti dytiachykh budynkiv dlia ditei-syrit", dis...cand. ped. nauk: 13.00.07, Prykarpatskyi un-t im. V. Stefanyka, Ivano-Frankivsk, 2001.
- [4] A.O. Arkhaimova, "Pryntsypy arkhitekturno-planuvalnykh rishen sotsialno-reabilitatsiinykh tsentriv (dlia bezprytulnykh ditei ta pidlitkiv)", avtoref. dis. cand. arkh.: 18.00.02, Kyivskoho natsionalnoho universytetu budivnytstva i arkhitektury, Kyiv, 2005.
- [5] L.B. Gnes, "Arkhitekturno-planuvalna orhanizatsiia dytiachykh budynkiv simeinoho typu" [Online]. Available: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Spam\\_2010\\_24\\_46](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Spam_2010_24_46). Accessed on: September 10, 2022.
- [6] N. Myroshnikova, Yu. Doroshenko, "Budynky vykhovannia ditei-syrit: retrospektyva ta typolohiia zakladiv opiky", *Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu budivnytstva i arkhitektury*, no. 38, p. 445 – 451, 2015.
- [7] P. Sankov, S. Tkach, A. Podolinnyi, "Metodyka formuvannia budynkiv - internativ dlia sotsialnoi adaptatsii ditei doshkilnoho ta shkilnoho viku", *Visnyk Prydnistrovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva i arkhitektury*, no. 90, pp. 164-170, 2016.
- [8] V. Abyzov, O. Voloshchenko, "Formuvannia predmetno-prostorovoho seredovyscha dytiachykh pryulkiv, Aktualni problemy suchasnoho dyzainu", *Zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*. Kyiv, 2018, no. 2, pp. 112-115.
- [9] V.A. Abyzov, A.O. Kirnaz, "Osoblyvosti formuvannia prostoru dytiachykh budynkiv simeinoho typu", [Online]. Available: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/td\\_2020\\_1\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2020_1_5). Accessed on: September 15, 2022.
- [10] A.V. Koval-Tsepova, "Pryntsypy dyzainu interieriv zakladiv sotsialnoho zakhystu ditei" dis. cand. mystetst: 17.00.07, Natsionalnyi universytet «Lvivska politehnika». Lviv, 2021.
- [11] Z. Obitochna, "Funktsionalno-planuvalna orhanizatsiia tsentru dlia spilnoho tymchasovoho perebuvannia osib pokhlyloho viku ta ditei-syrit", *Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu budivnytstva i arkhitektury*, no. 62, pp . 292-303, 2022.

---

**ПРОБЛЕМАТИКА АРХІТЕКТУРИ ДИТЯЧИХ ЗАКЛАДІВ ІНТЕРНАТНОГО ТИПУ  
У ВІТЧИЗНЯНОМУ НАУКОВОМУ ДИСКУРСІ**

**Бабич О.М.**, аспірантка,  
o.krokhtyak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2377-5891  
*Національний університет «Львівська політехніка»*  
вул. С. Бандери, 12, 79000, Україна

**Анотація.** У статті розглянуто питання переосмислення архітектурних якостей будівлі інтернатного типу у вітчизняному дискурсі. Простежено еволюцію поглядів на основні пріоритети закладу альтернативного догляду за дітьми. Визначено ключову роль адаптації Україною стратегії деінституалізації у розвитку підходів до трактування інтернатної будівлі. В хронологічних межах останніх 30 років виділено три етапи трансформації теоретичної думки щодо планувальної та просторової структури закладу опіки. Один із них пов'язаний із інерцією функціоналістичних підходів, пріоритетом котрих були аспекти фізичного здоров'я та забезпечення відповідного соціального рівня. Другий етап відображає усвідомлення недостатності вітальної прагматики і пошуки різних способів впливу на соціальну адаптацію та психологію позитивної взаємодії. На третьому етапі відзначається поступовий перехід до розуміння інтернатної будівлі як камерної маломісткої структури орієнтованої на сімейний тип співжиття. Це відкрило перспективу суттєвого переосмислення методики проектування закладів альтернативної опіки, пошуків різних прийомів адаптації вже існуючих будівель та проектування нових на засадах, котрі, загалом, відповідають так званій стратегії деінституалізації адаптованої Україною у 2017 році.

В зв'язку із цим, виникає питання оцінки сучасного стану вітчизняної наукової думки щодо проектування інтернатних закладів. На основі використаних методів, наводиться її порівняння із сучасним розумінням споруди для альтернативної опіки у країнах Заходу, де стратегія деінституалізації має тривалішу історію і дала певні теоретичні та практичні результати. В загальному встановлено, що вітчизняний дискурс у цій сфері, не дивлячись на відносно малу чисельність праць, відповідає основним тенденціям еволюції уявлень про середовище піклування для дітей-сиріт та дітей з особливими потребами. Встановлено ряд особливостей, котрі характерні для актуальних вітчизняних ідей в царині піклування і можуть стати основою для власної традиції архітектурної інтерпретації дитячих інтернатних закладів.

**Ключові слова:** інтернат, проблематика, дискурс, деінституалізація, трансформація.

Стаття надійшла до редакції 28.12.2022

## FUNCTIONAL QUALITIES OF LVIV'S NEWEST CHRISTIAN CHURCHES

**Savka I. V.**, Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor,  
savka68@meta.ua, ORCID: 0000-0002-3213-0921

*Ivan Franko National University of Lviv*  
1, University Str., Lviv, 79000, Ukraine

**Gulchenko S. H.**, a teacher of English,  
savka68@meta.ua, ORCID: 0000-0002-6551-6935

*Lviv Pedagogical Vocational College of Ivan Franko National University*  
7, Tugan-Baranovsky Str., Lviv, 79000, Ukraine

**Zaiats O. Y.**, Master of Architecture,  
ostzayats24@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0026-2812

*National University Lviv Polytechnic*  
12, Stepan Bandera St, Lviv, 79000, Ukraine

**Abstract.** The article considers the problems of Lviv's newest sacred architectural buildings, namely their functional qualities. It is proven that among the main reasons why religious people rarely attend liturgies can be a lack of time or a general reluctance to visit the church, giving priority to other matters.

The following principles of the designing of church educational institutions are given: denominationalism and ecumenism; multi-education; sacredness; worldliness; inclusiveness; flexibility and mobility; traditionalism and modernity.

The main functional zones are distinguished, which include the entrance zone, sanctuary, entertainment and recreation, educational, dining, residential, commercial, administrative, technical, household, exhibition and auxiliary groups of objects.

The necessity of searching for new ways and means of spreading spiritual knowledge in society is indicated. It requires new methods and approaches in the design of institutions of religious activity. Special attention is paid to the needs of people with disabilities.

Public spaces are divided into functional and cultural and educational spaces.

Types of location of public spaces in churches are described, they are: part of the floor, in a specially built building, with a specially decorated entrance, under the open sky, part of the building.

The topic of public space in temples is considered. It is noted that the building of the spiritual retreat center, which combines various social functions, is designed in such a way as to ensure the comfort of visitors and the smooth operation of all functional processes. The internal organization of space plays an important role in this. The interior is the final addition to create an artistic image and overall harmonious composition.

In the study, the functions of sacred architecture are determined: (commercial function, social/public function, religious function, etc.). It is determined that the church, as a building, is historically something more than a religious building. It is proposed to design the temple as multifunctional and to develop it not only as a religious building, but also as a public area. Recommendations on the architectural solution of sacred buildings are given, an overview of individual examples of modern sacred architecture in Lviv is given. The functional properties of modern churches in Lviv are analyzed.

**Key words:** functional properties, modern churches, sacred architecture, cult building, public function.

**Introduction.** Along with obtaining independence from the Soviet Union, new opportunities in the construction of sacred architecture opened up for Ukraine.

Although there are many wonderful examples of historical sacred architecture of different styles and eras in Lviv, there was and still is an urgent need to build new churches. After all, the city has significantly expanded over the past half century, the population has increased, and the demand for sacred architecture has not disappeared, even after the socialist regime. Also, the Church itself is interested in increasing the number of new parishioners.

**Analysis of research sources and recent publications.** In modern sacred architecture, this issue has been discussed by many scientists. The question of the shape and appearance of modern sacred architecture is considered by such scientists as: Hnatiuk L., Kyuntsli R., Stepaniuk R., Chaplinskyi Y., Rodoslav Zhuk., Bezv M., Kryvoruchko Y. etc.

The theme of the symbolism and tradition of the sacred architecture of Ukraine is revealed in the works of such scientists as Y. O. Doroshenko, R. O. Pustovoit, M. Bezv, L. Hnatyuk.

Authors who analyze the role of the Church in society: Podorozhnyi Y. A., Rybachuk M., Dyachok O. M. The public function of modern Ukrainian churches is considered by: Stotsko R.Z., Proskuryakov V. I., Kucher A. M. etc.

The following authors Yatsiv M., Shevchuk G., Hnidec R. considered features of the constructive solution of temples, as well as their acoustics and lighting.

There are many studies and publications on the topic of sacred architecture of Ukraine, but almost all of them consider historical temples.

You can also mention Julian Chaplinskyi's video blog, namely the lecture "Think the city: the crisis of modern sacred architecture" [1], however, this work is more concerned with the formative qualities of temples.

Currently, there are not many studies that would reveal the functional qualities of modern Lviv churches, which indicates the relevance of this topic.

**Purpose and objectives.** The purpose of the article is to analyze the problems related to the multifunctionality of churches, to analyze the operational and functional qualities of the newest churches in Lviv.

**Methods.** The Internet, literature, and interviews with temple visitors will be used to collect data. For the study, churches built only in Lviv, and in the period from 1990 to 2021 were examined.

**The base material and results of research.** Throughout history, the Ukrainian church, as a building, was not only a place of worship, but also a center of public activity, a cultural and educational space. Fraternities were concentrated near the church, which created printing houses, hospitals, and homes for the elderly. The sacristy performed the functions of a bank and a library [2].

In the scientific works of modern Ukrainian researchers on the topic of sacred architecture, mainly the architectural-figurative component of the temple is highlighted, without considering the social role of the temple in the life of Ukrainians. Such scientists as V. Kutsevich, Yu. Kryvoruchko, T. Hevryk, V. Semchyshyn, O. Horbyk, M. Yatsiv and V. Tregubov, V. Proskuryakova and V. Kutsevich studied these issues in more detail [3-5].

In his work "Architectural typology of spaces for public activities in the churches of M.-D. Nimtsiv" scientists V.I. Proskuryakov, A.M. Kucher consider the topic of public space in temples.

According to scientists, it is much easier to design and build a church and public space at the same time and in a complex. The experience of Ukrainian colleagues abroad has long proved the possibility and expediency of such a practice [2].

In the work of scientists, there are examples of church projects by the Ukrainian architect M.-D. Nimtsiv, and on this basis, a classification of types of spaces for public activities in the complexes of Ukrainian churches was carried out. The following types of location of public spaces in churches are described, such as: part of the floor, in a specially built building, with a specially decorated entrance, under the open sky, part of the building [2].

Scientists divide public spaces into functional and cultural and educational ones.

Functional elements include: cabinets, offices, communications, technical, warehouse, sanitary facilities, wardrobes, multifunctional halls, stages, theaters and others. According to the genre of cultural and educational activity, public spaces are divided into societies, unions,

organizations, places of enlightenment, theaters. Here you can hold meetings, rallies, theater performances, evenings, holidays, ceremonial events, and solve organizational issues [2].

The authors believe that in churches it is necessary to form both spaces aimed at the cultural enrichment of believers, such as theaters, cinema halls, libraries, and more functional and organizational spaces, such as halls, offices, youth organizations, etc. [2].

Regarding the spatial planning solution, according to the authors, public buildings should be joined with the temple so that they do not infringe the integral perception of it as a sacred building [2].

The authors also pay attention to the needs of people with disabilities, in particular, they indicate the need to equip ramps and allocate separate places in the parking lot.

We agree with the authors regarding the classification of types of location of public spaces at the temple, as well as with their conclusions concerning the cultural and educational function of sacred buildings.

The church also performs a spiritual and educational function in society. In the church building, both educational institutions and circles, as well as premises for catechesis, retreats, or consultations on religious and other issues can be concentrated.

The topic of religious enlightenment is considered in the work of K.T. Golubchak "Architectural and planning organization of spiritual and retreat centers of the Ukrainian Greek-Catholic Church". The author believes that the need for the formation and transmission of spiritual knowledge and relevant values in society, and therefore, the urgent need to find new ways and means of spreading them in society, requires new methods and approaches in the design of institutions of religious activity [6].

The scientist reveals the topic of the retreat centers in the church building. According to the author, the architectural-spatial organization of the spiritual-retreat center is a complete structural system that requires a comprehensive study and consideration of two important aspects: the stages of formation of planning and volumetric-spatial elements and canonical elements and symbols of the sacred space [6].

"In 2011, the Patriarchal Pilgrimage Center of the UGCC issued a directory with detailed information on the main pilgrimage centers of Ukraine. For Ukraine, spiritual retreats are a relatively new practice, and therefore little-studied", it is indicated in the work [6].

Having conducted an overview of world examples of spiritual retreat centers, the author concludes that a characteristic feature of modern sacred buildings and spiritual retreat centers is additional space for various spheres of social activity, such as leisure, recreation, creativity, education and health promotion, which within of the complex provide a full-fledged spiritual development of the individual [6].

The scientist singled out the main functional zones, which include the entrance zone, sanctuary, entertainment and recreation, educational, dining, residential, commercial, administrative, technical, household, exhibition and auxiliary groups of objects.

The work presents the principles of designing spiritual and retreat centers, in particular the principle of focusing on the spiritual component, the principle of prioritizing sacred elements in the selection of design spaces, the principle of differentiation based on the potential of visitors (target audience), the principle of interconnection of design spaces with the functional purpose of the building, the principle of integration and the principle of interfaith tolerance – these are some of the principles that should be remembered by designers of psychiatric hospitals and recreation centers [6].

The building of the spiritual retreat center, which combines various social functions, is designed in such a way as to ensure the comfort of visitors and the smooth operation of all functional processes. The internal organization of space plays an important role in this. The interior is the final addition to create an artistic image and overall harmonious composition [6].

We agree with the author that additional space for various spheres of social activity, including creativity and education, recreation and rehabilitation, is important for religious centers.

In our opinion, it is worth paying attention to the principles of designing spiritual retreat centers, such as the principle of differentiation based on the potential of parishioners.

The work "Architecture of Roman Catholic Educational Institutions of Modern Ukraine" by R. Stotska, formulates the basic principles and presents practical recommendations for the design of a church spiritual and educational institution in Ukraine.

The work presents the following principles of designing church educational institutions: denominationalism and ecumenism; multi-education; sacredness; worldliness; inclusiveness; flexibility and mobility; traditionalism and modernity. It is noted that the center of religious and humanitarian education as an architectural complex is a union of units of spiritual and humanitarian education of all levels in Ukraine, making a single architectural ensemble with the church as its main ideological and visual object [7].

We share the author's view on inclusiveness, global enlightenment and ecumenism when designing church educational institutions.

In general, the functional purpose of a sacred building can be conditionally divided into three points:

1. *Religious function.* Carrying out liturgies, rites and sacraments. The religious function is the main, defining one for a sacred building. Therefore, a successfully designed church should have good conditions for holding these events, that is, should have good acoustics, planning, lighting, microclimate, etc.

This item should also include catechism, the provision of various consulting services related to religious topics.

Since the Christian religion includes a missionary component, the church, as a Christian building, also faces the task of increasing the number of parishioners, where various architectural solutions can be of great help.

2. *Social/public function.* The temple, as a place of regular gathering of the community, should also perform a significant social function. Considering that most people, choosing a temple, pay attention to the proximity of the temple location [8, 9], residents of the residential area can gather in temples for conversations and discussions. The temple building may have special places for meetings and discussions, public debates, and performances [8, 10, 11].

This also includes charities and various rehabilitation services.

3. *Commercial function.* The temple can rent out various premises, places in the parking lot, serve as a place for music concerts and other events. It can also contain various public facilities, that is, a library, offices, a refectory, a gym, an educational institution and clubs for young people etc.

Every vicar of the church is interested in increasing the number of visitors to his church. However, new visitors are not necessarily people who have recently converted to a particular denomination. There are many people who identify themselves as Christians, but for one reason or another do not often go church.

In the Pew Research Center study "Choosing a New Church or House of Worship", a survey was conducted about the religious life of the US citizens. Although the survey was not conducted among Ukrainians, its data are valuable for us due to the certain universality of this issue.

"More than one in five Americans (22%) attend religious services no more than a few times a year, but they say there was a period in their lives when they attended the church more often. When they were asked an open-ended question about why religious attendance has declined, nearly half pointed to practical problems as the reason. This includes one in five who say they are too busy to attend religious services regularly (for example, because of their work schedule) and one in ten who say that going to church is not high on their personal priority list (for example, because they are "disaccustomed themselves from it" or "too lazy" to attend regularly)" [9].

So, among the main reasons why religious people rarely attend liturgies, one can single out lack of time or the usual reluctance to visit the temple, giving priority to other matters.

"Today, the church is expanding its functions: parishioners not only attend services, but also gather for seminars, communicate, organize exhibitions and holidays etc. Therefore, when planning the space of the temple complex, it is necessary to take into account the appearance of new functional auxiliary premises" [9, 11].

Given this it is expedient to design a multi-functional temple and develop it not only as a religious building, but also as a public area. It is desirable to provide recreational space, premises and activities for young people, as well as more secular premises, such as a refectory or a library. After all, such a church will serve not only as a venue for liturgies. Believers in such churches often stay even after the Divine Service, and the church itself begins to play a more important role in their lives.

The reason for the higher level of attendance at churches in the past can be attributed to the fact that earlier the church building played a significant social role in the life of the believer and the community. The architectural design and planning of the church should also contribute to the strengthening of social bonds among its parishioners and encourage a more active religious life. Therefore, it is important to provide premises for meetings, discussions and debates, public libraries, etc. in the temple complex [8, 9]. Such expected things as the friendly and fascinating environment of the building, its original design and shape can help in the popularization of the temple [10].

It is worth noting that the church, as a building, is historically something more than a religious building. Historical sacral complexes are also centers of education and philosophy, libraries, community centers, and even defense structures. Therefore, there is nothing exclusively modernistic in the idea of a multifunctional temple.

Foreign experience in designing a modern sacred building with a developed public space: Korean Presbyterian Church, USA, 2013 [12] (Fig. 1). Architects: Arcari + Iovino Architects.

The church hall has a capacity of 380 parishioners and is acoustically designed to host musical concerts and performances in addition to traditional functions. Due to its multifunctionality, believers gather before and after the service. In this two-story building there is a picture gallery, where the works of the parishioners are exhibited. In the basement there are three children's chapels for different age groups (Fig. 2 and Fig. 3). The recreation area also has an indoor basketball court and a kitchen. The monolithic vertical ribs of the sanctuary allow diffused light to enter the space through openings from the floor to the ceiling. Together with the ceiling system, they improve the acoustic quality of the performance [12].



Fig. 1. Korean Presbyterian Church in the USA

Among the modern Lviv churches with the most developed public function, we can single out: Church of the Nativity of the Holy Virgin, St. John Paul II Square. Denomination: UGCC. Architect: Radyslav Zhuk. End of construction: 2000.

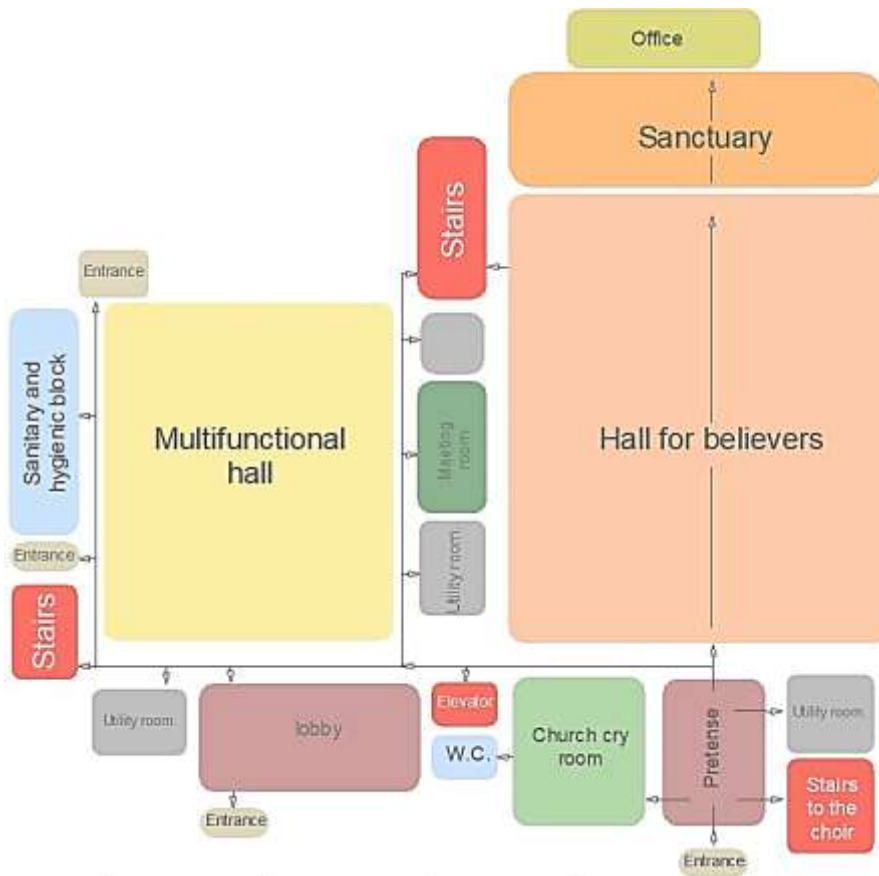


Fig. 2. Korean Presbyterian Church in the USA. Functional zoning of the 1st floor. The author's design

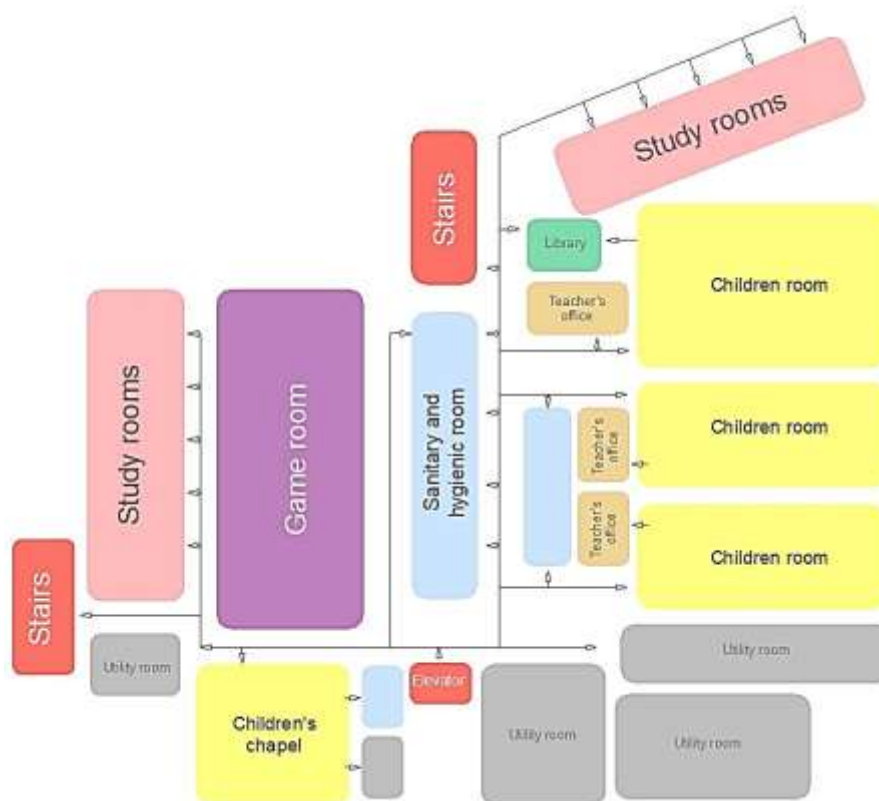


Fig. 3. Korean Presbyterian Church in the USA. Functional zoning of the basement floor. The author's design

The church is located at the intersection of two main streets and compositional axes of Sykhiv and is one of the key elements in the formation of the general panorama of the district (Fig. 4). At the same time, the church is an important public area and a meeting place for many residents of the Sykhiv district. In general, this is a rather multifunctional complex. The territory of the temple includes many premises that are aimed specifically at young people. In addition to the Sunday school, there are also various creative clubs here, the assembly hall is used for showing films, and classical music concerts are sometimes held in the church hall [13, 14]. Even the facade of the building is used in an original way: from time to time, a movie projector is broadcast on it [15].

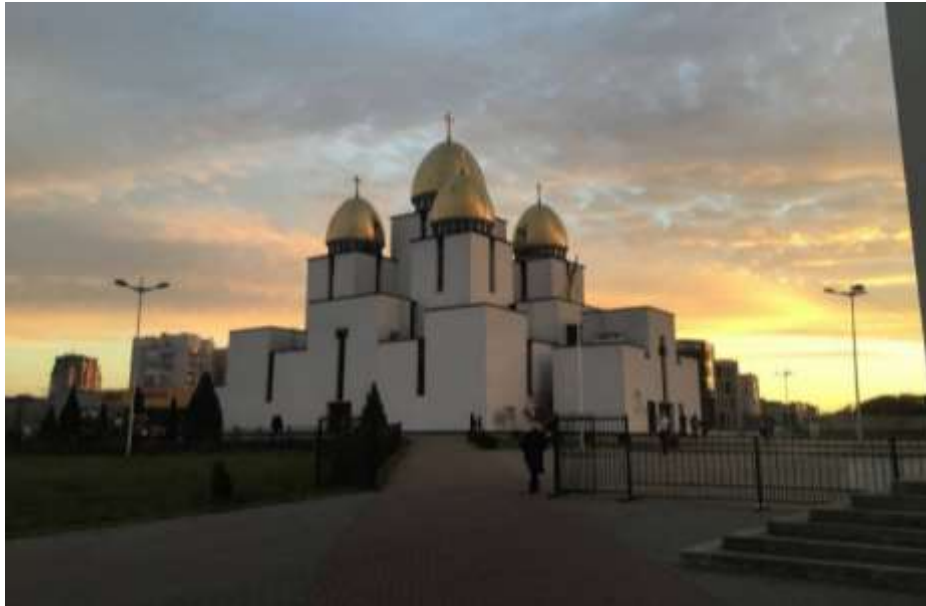


Fig. 4. Church of the Nativity of the Holy Virgin. Side view

The premises of the administration, school, and clubs are located in the basement of the church, and thus do not conflict with the architecture of the church (Fig. 5).

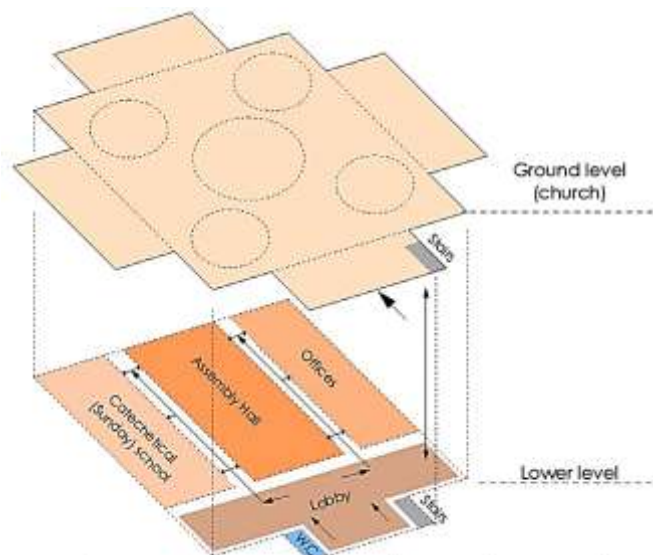


Fig. 5. Scheme of functional zoning of the Church of the Nativity of the Holy Virgin. The author's design

Golgotha House of Prayer (Fig. 6), Skrypnyka Str., Sykhiv. Denomination: Protestant church. End of construction: 2006.



Fig. 6. Golgotha House of Prayer. Author's photo

Today, the building of the House of Prayer and the seminary is one of the largest spiritual institutions in the Western region. The prayer house project was developed by Ivan Kovalenko and G. Kalinin.

The premises of spiritual educational institutions are also integrated into the building of the House of Prayer.

They comprise a library with an administrative office, five classrooms, a service hall, a computer room and a reading room. The building also has a dormitory, dining hall, gym, and recreation rooms [16, 17].

The temple fulfills its public function very well. Some people who walk around the territory do not even call themselves Protestants, but say that they come here regularly.

Chapel of St. Luigi Orione (Fig. 7), Abraham Lincoln St. Denomination: UGCC. Architect: Mykola Rybenchuk. End of construction: 2007.



Fig. 7. Chapel of St. Luigi Orione. Author's photo

The chapel is part of the monastery complex of St. Luigi Orione, which also includes a temple designed by the Swiss architect Mario Botta, and a monastery. If the previous examples were entire sacral complexes with large territories, so this chapel is an example of the arrangement of a developed public space even in a small building. Despite its small size, the chapel is very multifunctional. One building contains both the hall itself for believers and premises for young people: a catechetical school, a gymnasium, offices for the youth community, as well as administrative premises and a rehabilitation center [18].

**Conclusion.** So, based on the conducted review and research, we can conclude that in modern Lviv churches it is necessary to develop their public function more widely, as on the territory of the

church believers would like to see a library, conference hall, children's groups, etc. At the same time, it is desirable to improve the church territory. However, it is important to maintain a balance so as not to make Christian churches look like ordinary multifunctional centers.

### References

- [1] Chaplinsky VLOG. "Mysly misto" Kryza sakralnoi arkhitektury, 2018. YouTube. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=a31YmbnVUio>. Accessed on: December 19, 2022.
- [2] V.I. Proskuriakov, A.M. Kucher, *Arkhitekturna typolohiia prostoriv dlia hromadskoi diialnosti v tserkvakh m.-d. Nimtsiva*. Natsionalnyi universytet "Lvivska politekhnika", 2007.
- [3] V. V. Kutsevych Kultovi budynky ta sporudy riznykh konfesii. K.: ZNDIEP, 2002.
- [4] Yu. Kryvoruchko, "Dzherela i tendentsii rozvytku sakralnoi arkhitektury Ukrainy", *Zapysy naukovoho tovarystva im. Shevchenka*, T. SSXLI, Lviv, pp. 65–83, 2001.
- [5] T. Hevryk, *Dereviani khramy Ukrainy*. Niu-York: Ukrainskyi muzei: Drukarnia M. Babiuna, 1987.
- [6] K.T. Holubchak, "Arkhitekturno-planuvalna orhanizatsiia dukhovno-rekolektsiinykh tsentriv Ukrainskoi Hreko-Katolytskoi Tserkvy". 2018. [Online]. Available: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/42909>. Accessed on: January 12, 2023.
- [7] R. Z. Stotsko, "Arkhitektura rymo-katolytskykh navchalnykh zakladiv suchasnoi Ukrainy", *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*. Seriia: «Arkhitektura», no. 1 (7), pp. 162-170, 2022.
- [8] Its hard to go to church. The Atlantic. [Online]. Available: <https://www.theatlantic.com/politics/archive/2016/08/religious-participation-survey/496940/>. Accessed on: December 10, 2022.
- [9] Choosing a new church or house of worship. Pew Research Centers Religion & Public Life Project. [Online]. Available: <https://www.pewresearch.org/religion/2016/08/23/choosing-a-new-church-or-house-of-worship>. Accessed on: November 17, 2022.
- [10] Five proven ways to increase church attendance - CM select. CM Select. [Online]. Available: <https://www.cmselect.com/five-ways-to-increase-church-attendance/>. Accessed on: December 10, 2022.
- [11] Church building design trends in the 21st century. MultiBriefs - Your source for industry-specific News Briefs. Rezhym dostupu do resursu: [Online]. Available: [https://www.multibriefs.com/briefs/exclusive/church\\_building\\_design\\_trends\\_21st\\_century.html](https://www.multibriefs.com/briefs/exclusive/church_building_design_trends_21st_century.html). Accessed on: November 13, 2022.
- [12] Korean presbyterian church / arcari + iovino architects. ArchDaily. [Online]. Available: <https://www.archdaily.com/468595/korean-presbyterian-church-arcari-iovino-architects>. Accessed on: December 1, 2022.
- [13] Khram Rizdva Presviatoi Bohorodytsi: harmoniine poiednannia tradytsiinoho ta modernoho. Dukhovna Velych Lvova. [Online]. Available: <https://velychlviv.com/hram-rizdva-presvyatoyi-bogorodytsi-garmonijne-poyednannya-tradytsijnogo-ta-modernogo-2/>. Accessed on: November 27, 2022.
- [14] Uchasnyky proektiv Wikimedia. Tserkva rizdva presviatoi bohorodytsi (Lviv)–vikipediia. Vikipediia. [Online]. Available: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Tserkva\\_Rizdva\\_Presviatoi\\_Bohorodytsi\\_\(Lviv\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Tserkva_Rizdva_Presviatoi_Bohorodytsi_(Lviv)). Accessed on: December 1, 2022.
- [15] ZAXID.NET. Na stinakh khramu Rizdva Presviatoi Bohorodytsi pokazaly film «Kapelany», 2015. YouTube. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=uW5VjA5bvC4>. Accessed on: January 12, 2023.
- [16] Molytovnyi dim khrystyian viry yevanhelskoi "holhofa". Interaktyvnyi Lviv. [Online]. Available: <https://lia.lvivcenter.org/uk/objects/skrypnika-8-church/>. Accessed on: January 22, 2023.

- [17] Dim molytvy khrystyian viry yevanhelskoi «holhofa» – vikipediia. Vikipediia. Avialable: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Dim\\_molytvy\\_Khrystyian\\_Viry\\_Yevanhelskoi\\_«Holhofa»](https://uk.wikipedia.org/wiki/Dim_molytvy_Khrystyian_Viry_Yevanhelskoi_«Holhofa»). Accessed on: November 17, 2022.
- [18] Tserkva sviatoho luidzhi orione– vikipediia. Vikipediia. [Online]. Avialable: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Tserkva\\_sviatoho\\_Luidzhi\\_Orione](https://uk.wikipedia.org/wiki/Tserkva_sviatoho_Luidzhi_Orione). Accessed on: December 9, 2022.

## ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЯКОСТІ НОВІТНІХ ХРИСТІЯНСЬКИХ ХРАМІВ ЛЬВОВА

**Савка І.В.**, д.п.н., доцент,

savka68@meta.ua, ORCID: 0000-0002-3213-0921

*Львівський національний університет імені Івана Франка*

вул. Університетська 1, Львів, 79000, Україна

**Гульченко С.Г.**, викладач англійської мови,

savka68@meta.ua, ORCID: 0000-0002-6551-6935

*Львівський національний університет імені Івана Франка, відокремлений*

*структурний підрозділ «Педагогічний фаховий коледж»*

вул. Туган-Барановського 7, Львів, 79000, Україна

**Заяць О.Я.**, магістр,

ostzayats24@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0026-2812

*Національний університет «Львівська політехніка»*

вул. Степана Бандери 12, Львів, 79000, Україна

**Анотація.** Стаття розглядає проблеми новітніх сакральних архітектурних будівель Львова, а саме їх функціональні якості. Доведено, що серед основних причин, чому релігійні люди можуть рідко відвідувати літургії можна виділити брак часу або ж звичайне небажання відвідувати храм, надаючи пріоритет іншим справам.

Наведено наступні принципи проектування церковних освітніх закладів: конфесійність та екуменічність; мультиосвітність; сакральність; світськість; інклюзивність; гнучкість та мобільність; традиційність та модерн.

Виокремлено основні функціональні зони, які включають вхідну зону, святилище, розважально-рекреаційну, освітню, їдальню, житлову, комерційну, адміністративну, технічну, побутову, виставкову та допоміжну групи об'єктів.

Вказано на необхідність пошуку нових шляхів і засобів поширення духовних знань у суспільстві, вимагає нових методів і підходів в проектуванні закладів релігійної діяльності. Приділено особливу увагу на потреби осіб з обмеженими можливостями.

Громадські простори поділяють на функціональні та культурно-просвітницькі. Описано такі типи розташування громадських просторів у церквах, як: частина поверху, у спеціально збудованому будинку, зі спеціально оформленим входом, під відкритим небом, частина будівлі.

Розглянуто тему громадського простору у храмах. Зазначено, що Будівля духовно-реколекційного центру, що поєднує в собі різні соціальні функції, спроектована таким чином, щоб забезпечити комфорт відвідувачів і безперебійну роботу всіх функціональних процесів. Важливу роль у цьому відіграє внутрішня організація простору. Інтер'єр є фінальним доповненням для створення художнього образу та загальної гармонійної композиції.

У дослідженні визначено функції сакральної архітектури: (комерційна функція, соціальна/громадська функція, релігійна функція тощо). Визначено, що церква, як будівля історично є чимось більшим ніж релігійна споруда. Запропоновано проектувати храм багатофункціональним та розвивати його не лише, як культову споруду, але й громадську зону. Надано рекомендації щодо архітектурного вирішення сакральних споруд, наведено огляд окремих прикладів сучасної сакральної архітектури Львова. Проаналізовано функціональні властивості сучасних храмів Львова.

**Ключові слова:** функціональні властивості, сучасні храми, сакральної архітектури, культова споруда, громадська функція.

Стаття надійшла до редакції 17.02.2023

**STRESS-DEFORMED STATE OF VERTICAL CILINDRICAL METAL SHELL UNDER TEMPERATURE CLIMATE IMPACT**

**Zhdanov A.A.**, PhD, Professor,  
ajdanow1945@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3304-5729  
*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
4, Didrihsona, str., Odessa, 65029, Ukraine

**Petrov V.N.**, PhD, Professor,  
0673972002@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3262-9463  
*National University «Odessa Polytechnic»*,  
1, ave. Shevchenko, m. Odessa, 65044, Ukraine

**Abstract.** Vertical cylindrical containers are widely used for storage of granular bulk materials. The enclosing side surface of such containers is made in the form of cylindrical metal circular shells with a wall thickness that is constant or piecewise constant along the height of the shell. Known designs for storage of bulk materials of the reservoir type with the installation of a cylindrical shell on the annular foundation with hinged fixed attachment of the shell to the foundation. Thin-walled shells are made suspended from the supporting structures of the storage facilities. To stabilize the cylindrical shape of the shell and its position in space, the suspended shells are pre-tensioned in the vertical direction. During operation, storage facilities are empty and filled with bulk materials, exposed to the environment in the form of wind and temperature climatic influences.

The object of study of this work is the enclosing structures of storages of granular bulk materials in the form of vertical circular cylindrical thin-walled metal shells, in the general case of piecewise constant thickness, subject to temperature and climatic influences of the environment – changes in the temperature of the outside air, direct and diffuse solar radiation.

The subject of the study is the components of the stress-strain state of the shell due to changes in temperature and climatic influences. The performed studies of the temperature fields of storage shells on models and full-scale objects made it possible to substantiate the assignment of the temperature field of cylindrical storage shells by Fourier series.

One-sided solar heating of cylindrical storage shells completely illuminated by the sun induces in the shell wall a flat temperature field symmetrical with respect to the normal of incidence of sunlight, which can be represented by a Fourier series with five terms of the cosine expansion series. In the presence of a structure located next to the shell, which covers half of the shell along the entire height in the circumferential direction, the temperature field is described by a Fourier series containing 10 harmonics of expansion in sines and cosines.

The small thickness of the shell, the significant radius of curvature of the shells, the large thermal diffusivity of metals provides a small variability of the temperature of the shell over the thickness, the ability to describe the stress-strain state of the shell, the momentless theory and a simple edge effect.

Formulas are obtained in Fourier series for the forces of a momentless state, the residuals of which at the joints of shell chords of different thicknesses and in the support zones are eliminated by a simple edge effect.

**Keywords:** momentless theory of shells, theory of edge effect, temperature climatic influences, forces and displacements in an empty vertical cylindrical shell.

**Introduction.** Storages of bulk materials in the form of vertical cylindrical metal thin-walled shells, during operation, are empty and filled with bulk material and experience the temperature climatic effects described in [1]. A change in the temperature of the outside air, the intensity of

direct and scattered solar radiation induces a flat temperature field in the shell – the temperature of the shell is constant along the generatrix and variable in the circumferential direction, approximated by a Fourier series containing 5 terms of the cosine expansion series for the shell fully illuminated by the sun and 10 members of the series expansion in cosines and sines - for a shell half of which is covered by a screen at its full height. The temperature drop across the thickness of the shell can be neglected due to the small thickness of the shell (3 ... 10 mm) and a significant coefficient of thermal diffusivity of metals (steel, aluminum). Has a direct effect on the stress-strain state (SSS) of the shell? In this case, it is necessary to take into account the variability in time of the position of the sun in the sky and the corresponding change in the position of the normal of the incidence of sunlight on the shell. The stress-strain state of the walls of bulk materials storages under temperature climatic influences is necessary to know when designing new bulk materials storages and assessing the strength of existing ones.

**Analysis of recent research and publications.** In [1], the temperature climatic effects on cylindrical metal shells were investigated, in [2, 3], the stress-strain state of the shell on an elastic foundation with a piecewise constant was investigated, and in [4] with a piecewise linear bed coefficient with axisymmetric cooling of the shell.

The small thickness of the shells, the absence of significant gradients of changes in the shell temperature led to the application in [2-4] of the momentless theory of shells, supplemented, to eliminate the residuals of the momentless solution, the theory of a simple edge effect. In this study, we use a similar proven approach.

**Goals and objectives.** The purpose of this work is to study the stress-strain state of an empty vertical cylindrical metal thin walled shell of piecewise constant (in height) thickness, (Figure 1, a), caused by temperature climatic influences – non-axisymmetric heating-cooling of the shell to the state of the same temperature in all of its points.

**Methods and Results.** Let us write down the basic equations of the momentless theory of thin cylindrical shells [5, 6]. Geometric Equations:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \alpha_t t, \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{R} \left( \frac{\partial v}{\partial \beta} + w \right) + \alpha_t t, \quad (1)$$

where  $u, v, w$  – components of displacements of points of the middle surface of the shell (positive directions are shown in Figure 1, a);

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – deformation of the middle surface, respectively, in the axial and circumferential directions;

$\alpha, \beta$  – dimensionless coordinates of the points of the middle surface:  $\alpha = x/R$ , (angular coordinate);

$t$  – shell temperature is a given function of coordinates  $\alpha$  and  $\beta$ ;

$R$  – radius of the middle surface of the shell;

$h$  – shell thickness;

$E, \mu, \alpha_t$  – Young's modulus, Poisson's ratio and coefficient of linear thermal expansion of the shell material.

Positive directions of efforts and displacements are shown in Fig.1.

Physical equations for a cylindrical circular shell have the form:

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{Eh}{(1-\mu^2)R} \left[ \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \mu \left( \frac{\partial v}{\partial \beta} + w \right) - (1+\mu) \cdot \alpha_t \cdot R \cdot t \right], \\ N_2 &= \frac{Eh}{(1-\mu^2)R} \left[ \frac{\partial v}{\partial \beta} + w + \mu \frac{\partial u}{\partial \alpha} - (1+\mu) \cdot \alpha_t \cdot R \cdot t \right], \\ S &= \frac{Eh}{2(1+\mu) \cdot R} \left( \frac{\partial u}{\partial \beta} + \frac{\partial v}{\partial \alpha} \right). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

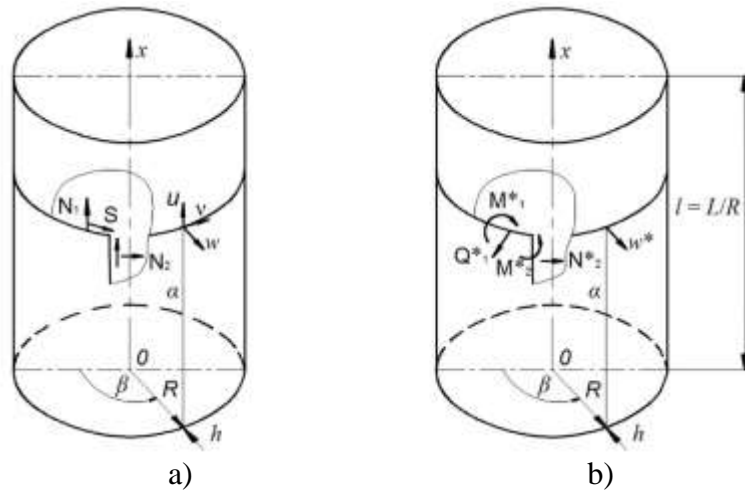


Fig. 1. Positive directions of effort and displacement:  
 a – momentless stress-strain state; b – the state of the edge effect

Equilibrium equations in displacements have the form:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \beta^2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \alpha \partial \beta} + \mu \frac{\partial w}{\partial \alpha} &= (1+\mu) \cdot \alpha_t \cdot R \cdot \frac{\partial t}{\partial \alpha}, \\ \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha \partial \beta} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \beta^2} + \frac{\partial w}{\partial \beta} &= (1+\mu) \cdot \alpha_t \cdot R \cdot \frac{\partial t}{\partial \beta}, \\ \mu \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{\partial v}{\partial \beta} + w &= (1+\mu) \cdot \alpha_t \cdot R \cdot t. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

The external influence is the flat temperature field of the shell of the form:

$$t(\beta) = t_0 + \sum_{n=1}^{10} (t_{nc} \cos n\beta + t_{ns} \sin n\beta). \quad (4)$$

The amplitudes of harmonics in (4) can be calculated according to the recommendations [1].

For stitching the belts and on the supporting edges of the shell, we use the theory of a simple edge effect, the main dependences of which are presented below [5]:

$$\frac{d^4 w_i^*}{d\alpha^4} + 4g_i^4 w_i^* = 0, \quad (5)$$

$$\text{where: } g_i^4 = 3(1-\mu^2) \frac{R^2}{h_i^2}, \quad D_i = \frac{Eh_i^3}{12(1-\mu^2)}.$$

Geometric Equations:

$$\varepsilon_2^* = \frac{w^*}{R}, \quad \gamma^* = \frac{1}{R} \frac{dw^*}{d\alpha}, \quad \varepsilon_1^* = 0. \quad (6)$$

Physical equations:

$$\left. \begin{aligned} N_1^* = 0, \quad N_2^* = \frac{Eh}{R} w^*, \quad M_1^* = -\frac{D}{R^2} \frac{d^2 w^*}{d\alpha^2}, \\ M_2^* = \mu \cdot M_1^*, \quad Q_1^* = \frac{D}{R^3} \frac{d^3 w^*}{d\alpha^3}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

The positive directions of forces, bending moments and displacements of the edge effect are shown in Figure 1, b.

Taking into account the form of the temperature field (4), the equilibrium equations (3) for each belt of the shell take the form:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \beta^2} + \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \alpha \partial \beta} + \mu \frac{\partial w}{\partial \alpha} &= 0, \\ \frac{1+\mu}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha \partial \beta} + \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \beta^2} + \frac{\partial w}{\partial \beta} &= (1+\mu) \cdot \alpha_t \cdot R \cdot \frac{\partial t}{\partial \beta}, \\ \mu \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{\partial v}{\partial \beta} + w &= (1+\mu) \cdot \alpha_t \cdot R \cdot t. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

In expressions (6-8), the index of the belt, for which the system of equations is written, is omitted.

**Research results.** *Axisymmetric temperature action* ( $n=0$ ). In this case,  $v=0$ , all derivatives with respect to  $\beta$  are equal to zero, and the system of equations (8) takes the form:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 u_0}{d\alpha^2} + \mu \frac{dw_0}{d\alpha} &= 0, \\ \mu \frac{du_0}{d\alpha} + w_0 &= (1+\mu) \alpha_t R t_0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Integrating the first equation (9) and substituting it into the second, we find:

$$\frac{du_0}{d\alpha} = \mu w_0 + C_1, \quad (10)$$

$$w_0 = \frac{\alpha_t R t_0}{1-\mu} - \frac{\mu}{1-\mu^2} C_1. \quad (11)$$

Substituting (11) into (10) and performing the integration, we obtain:

$$u_0(\alpha) = -\mu \frac{\alpha_t R t_0}{1-\mu} \alpha + \frac{C_1}{1-\mu^2} \alpha + C_2. \quad (12)$$

Arbitrary constants  $C_1$  and  $C_2$  included in (11) and (12) must be determined from the tangential boundary conditions:

$$u_{10}(0) = 0, \quad N_{1m}(l) = N_1^H - \mathcal{G} u_m(l) \quad (13)$$

and tangential conditions for joining the belts:

$$\left. \begin{aligned} u_i(l) &= u_{i+1}(0), \\ N_{li}(l) &= N_{li+1}(0). \end{aligned} \right\} (i = 1, 2, \dots, m-1) \quad (14)$$

where  $m$  – the number of belts of the shell of different thickness, the numbering of the belts starts from the fixed edge of the shell;

$N_1^H$  – pre-tensioning of the suspension shell in the axial direction;

$\mathcal{G}$  – stiffness coefficient of elastic fastening of the shell at the edge  $\alpha_m = l_m$ .

Taking into account [2], tangential conditions (13) and (14) explicitly look like this:

$$\left. \begin{aligned} C_{21} &= 0, \\ \frac{l_i}{1-\mu^2} C_{1i} + 1 \cdot C_{2i} + 0 \cdot C_{1,i+1} - 1 \cdot C_{2,i+1} &= \frac{\mu \cdot l_i}{1-\mu} \alpha_t R t_0, \\ h_i \cdot C_{1i} + 0 \cdot C_{2i} - h_{i+1} \cdot C_{1,i+1} + 0 \cdot C_{2,i+1} &= (1+\mu) \alpha_t R t_0 (h_i - h_{i+1}), \end{aligned} \right\} (i = 1, 2, \dots, m-1) \quad (15)$$

$$\left[ \frac{Eh_m}{(1-\mu^2)R} - \mathcal{G} \frac{l_m}{(1-\mu^2)} \right] C_{1m} - \mathcal{G} \cdot C_{2m} = N_1^H + \mathcal{G} \cdot \frac{\mu l_m}{1-\mu} \alpha_t R t_0 + \frac{Eh_m}{(1-\mu)} \alpha_t t_0.$$

Discrepancies of the momentless solution arise due to different thicknesses of adjacent belts. To satisfy the nontangential boundary conditions and the conditions for the continuity of radial displacements and angles of rotation at the joints of the chords, we will use the theory of a simple

edge effect, with success used earlier [2-4]. In the corresponding formulas [4], it is necessary to set the bedding coefficient of the base  $k(\alpha) = 0$ .

*Impact of non-axisymmetric components of the temperature field* ( $n \geq 1$ ). We seek the solution of the system of inhomogeneous equations (8) in the form of the sum of the general solution of the corresponding homogeneous and particular solution of the inhomogeneous system. Let's get a solution for an arbitrary belt. We omit the belt index in the calculations.

We represent the sought solutions in terms of two scalar functions  $\Phi(\alpha, \beta)$  and  $\Phi_t(\alpha, \beta)$ . In this case, the function  $\Phi(\alpha, \beta)$  determines the solution of the homogeneous system of equations and is introduced in accordance with [6] as follows:

$$\left. \begin{aligned} u_0 &= \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta^2} - \mu \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2} \right), \\ v_0 &= -\frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta^2} + (2 + \mu) \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2} \right), \\ w_0 &= \nabla^2 \nabla^2 \Phi \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

where:  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2}{\partial \beta^2}$  – Laplace operator.

By direct substitution, one can make sure that the introduced function satisfies the first two equations of the system. After substitution in the third equation (8), we obtain the resolving equation for the function  $\Phi(\alpha, \beta)$ :

$$\mu \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} - \mu^2 \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \alpha^4} - \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \beta^4} - (2 + \mu) \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + \nabla^2 \nabla^2 \Phi = 0. \quad (17)$$

Expanding the double Laplace operator and reducing similar terms in (17), we obtain the resolving equation for the function  $\Phi(\alpha, \beta)$  in the form:

$$\frac{\partial^4 \Phi}{\partial \alpha^4} = 0. \quad (18)$$

A particular solution is determined by the function  $\Phi_t(\alpha, \beta)$ , which, taking into account [7], we, introduce so that through it the displacements  $u_t$ ,  $v_t$  and  $w_t$  are expressed as follows:

$$\left. \begin{aligned} u_t &= (1 - \mu) \frac{\partial^3 \Phi_t}{\partial \alpha^3}, \\ v_t &= -(1 - \mu) \frac{\partial^3 \Phi_t}{\partial \alpha^2 \partial \beta}, \\ w_t &= (1 - \mu) \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} \nabla^2 \Phi_t. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\Phi(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^{10} [\Phi_c^n \cos n\beta + \Phi_s^n \sin n\beta], \quad (20)$$

$$\Phi_t(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^{10} [\Phi_{tc}^n \cos n\beta + \Phi_{ts}^n \sin n\beta], \quad (21)$$

Further calculations, without loss of generality of transformations, are carried out for the shell completely illuminated by the sun, i.e. containing 5 terms of the cosine expansion series. Substitution of (19) into (3) leads to the fact that all three equations coincide and the resolving equation for the function  $\Phi(\alpha, \beta)$  can be written in the form:

$$\frac{\partial^4 \Phi_t}{\partial \alpha^4} = \frac{\alpha_t R t}{1 - \mu}. \quad (22)$$

Taking into account (20) and (21), the resolving equations (18) and (22) for the  $n$ th term of the series are transformed into ordinary differential equations of the fourth order:

$$\frac{d^4 \Phi^n}{d\alpha^4} = 0, \quad (23)$$

$$\frac{d^4 \Phi_t^n}{d\alpha^4} = \frac{\alpha_t R t}{1 - \mu}. \quad (24)$$

The solutions to these equations are written in the form:

$$\Phi_c^n(\alpha) = C_{1c}^n \alpha^3 + C_{2c}^n \alpha^2 + C_{3c}^n \alpha + C_{4c}^n, \quad (25)$$

$$\Phi_{tc}^n(\alpha) = \frac{\alpha_t R t_{nc}}{1 - \mu} \cdot \frac{\alpha^4}{24}. \quad (26)$$

Taking into account (25) and (26)  $n - e$  terms of the series of displacements of the momentless solution look like this:

$$\left. \begin{aligned} u_c^n(\alpha) &= \alpha_t R t_{nc} \alpha - (3n^2 \alpha^2 + 6\mu) C_{1c}^n - 2n^2 \alpha C_{2c}^n - n^2 C_{3c}^n, \\ v_c^n(\alpha) &= \alpha_t R t_{nc} \frac{n\alpha^2}{2} - [n^3 \alpha^3 - (2 + \mu) 6n\alpha] C_{1c}^n - [n^3 \alpha^3 - (2 + \mu) 2n] C_{2c}^n - n^3 \alpha C_{3c}^n - n^3 C_{4c}^n, \\ w_c^n(\alpha) &= \alpha_t R t_{nc} \left( 1 - \frac{n^2 \alpha^2}{2} \right) + (n^4 \alpha^3 - 12n^2 \alpha) C_{1c}^n + (n^4 \alpha^2 - 4n^2) C_{2c}^n + n^4 \alpha C_{3c}^n + n^4 C_{4c}^n. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

Changing the index "c" to "s" in (27), we obtain formulas for calculating the amplitudes of the harmonics of the corresponding displacements at  $\sin n\beta$ . The first terms in formulas (27) are particular solutions.

Substituting (27) into physical equations (2) after appropriate transformations, we obtain expressions for tangential forces:

$$\left. \begin{aligned} N_{10c}(\alpha) &= \sum_{n=1}^{10} N_{10c}^n(\alpha) \cos n\beta, \\ N_{20c}(\alpha) &= \sum_{n=1}^{10} N_{20c}^n(\alpha) \cos n\beta, \\ S_{0c}(\alpha) &= \sum_{n=1}^{10} S_{0c}^n(\alpha) \sin n\beta. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

where:

$$\left. \begin{aligned} N_{10c}^n(\alpha) &= -\frac{Eh}{R} 2n^2 (3\alpha C_{1c}^n + C_{2c}^n), \\ N_{20c}^n(\alpha) &= 0, \\ S_{0c}^n(\alpha) &= \frac{Eh}{R} 6n C_{1c}^n. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

The formulas for the amplitudes of the harmonics of tangential forces (29) do not include particular solutions – they are identically equal to zero. It is characteristic that the circumferential force identically equal to zero, this is a consequence of the free movement of the shell in the radial direction.

Arbitrary constants in the expressions for the displacements (27) and effort (29), are determined from the tangential boundary conditions and docking conditions zones recorded for the amplitudes of the  $n$ - the term of a similar (15).

Supplementing the obtained solutions with the edge effect written for the  $n$ th harmonic similarly to [2, 3], we obtain a complete solution of the problem posed.

An empty vertical metal shell far from the fixed edges freely deforms in the radial direction, which explains the vanishing of the circumferential force of the momentless state  $N_2$  in the shell.

A feature of the temperature climatic effect on a vertical circular cylindrical shell is that the temperature field of the shell seems to follow the sun, enveloping the shell, while in the shell without a screen, the temperature field differs slightly from the one that is symmetric relative to the normal incidence of sunlight.

### Conclusions:

1. For a vertical empty cylindrical shell, with one-sided heating-cooling of the shell, a momentless solution in the Fourier series for the components of the stress-strain state (SSS) is obtained.

2. A simple edge effect in the Fourier series eliminates the residuals of the momentless solution.

3. Taking into account [1], five terms of the cosine expansion series are sufficient to describe the SSS components during cooling of a shell heated without a screen.

4. To describe the components of the stress-strain state of a shell during cooling of a shell heated in the presence of a screen covering half of the shell along its entire height [1], it is necessary to take into account ten terms of the expansion series in the circumferential direction in sines and cosines.

5. The circumferential force  $N_2(\alpha)$  of the momentless state is equal to zero as a consequence of the absence in the empty shell of restrictions on the shell displacement in the radial direction.

### References

- [1] A.A. Zhdanov, "Vliyanie solnechnoj radiacii na temperaturnye polya vertikal'nyh cilindricheskij hranilishch sypuchih materialov", *Visnik Odes'koï derzhavnoï akademii budivnictva ta arhitekturi*, no. 56, pp. 249-255, 2014.
- [2] A.A. Zhdanov, "Cilindricheskaya metallicheskaya obolochka na uprugom osnovanii pri temperaturnom klimaticheskom vozdeystvii", *Visnik Odes'koï derzhavnoï akademii budivnictva ta arhitekturi*, no. 57, pp. 152-160, 2015.
- [3] A.A. Zhdanov, "Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie cilindricheskoj metallicheskoj obolochki na kusochno-postoyannom uprugom osnovanii pri temperaturnom klimaticheskom vozdeystvii", *Visnik Odes'koï derzhavnoï akademii budivnictva ta arhitekturi*, no. 68, pp. 9-19, 2017.
- [4] A.A. Zhdanov, "Cilindricheskaya metallicheskaya obolochka na uprugom osnovanii pri osesimmetrichnom ohlazhdenii", *Tezisi dokladov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Aktualnye problemy inzhenernoy mehaniki*. Odesa: Vnishreklamservis, 2016, pp. 73-78.
- [5] A.L. Goldenveyzer, *Teoriya uprugih tonkih obolochek*. Moscow: Gostehteorizdat, 1953.
- [6] V.Z. Vlasov, *Obshchaya teoriya obolochek i ee prilozheniya v tekhnike*. Moscow: Gostehteorizdat, 1949.
- [7] L.I. Fridman, "Temperaturnye napryazheniya v kozhuhe koltsevoy kamery sgoraniy Vibratsionnaya prochnost i nadezhnost aviatsionnyh dvigateley", *Trudy Kujbyshevskogo aviacionnogo instituta* 19, Kuybishev: Izd-vo KuAI, 1965, pp. 299-306.

**НАПРУЖЕНО - ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ВЕРТИКАЛЬНОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ МЕТАЛЕВОЇ ОБОЛОНКИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОМУ КЛІМАТИЧНОМУ ВПЛИВІ**

**Жданов А.А.**, к.т.н., доцент,  
ajdanow1945@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3304-5729  
*Одеська державна академія будівництва та архітектури*  
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

**Петров В.Н.**, к.т.н., доцент,  
0673972002@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3262-9463  
*Національний університет «Одеська політехніка»*,  
просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65000, Україна

**Анотація.** Для зберігання зернистих сипких матеріалів широко використовуються вертикальні циліндричні ємності. Огороджувальна бічна поверхня таких ємностей виконується у вигляді циліндричних металевих кругових оболонок з постійною або зі шматково-постійною по висоті оболонки товщиною стінки. Відомі конструкції для зберігання сипких матеріалів резервуарного типу з установкою циліндричної оболонки на кільцевому фундаменті з шарнірно-нерухомим кріпленням оболонки до фундаменту. Тонкостінні оболонки роблять підвісними до несучих конструкцій сховищ. Для стабілізації циліндричної форми оболонки та її положення у просторі підвісні оболонки піддають попередньому натягу у вертикальному напрямку. У процесі експлуатації сховища бувають порожніми та заповненими сипучими матеріалами, схильні до впливу навколишнього середовища у вигляді вітрових та температурних кліматичних впливів.

Об'єктом дослідження даної роботи є огороджувальні конструкції сховищ зернистих сипучих матеріалів у вигляді вертикальних кругових циліндричних тонкостінних металевих оболонок, в загальному випадку кусково-постійної товщини, схильні до температурно-кліматичних впливів навколишнього середовища – зміни температури зовнішнього повітря, прямої та розсіяної сонячної радіації.

Предметом дослідження є компоненти напружено-деформованого стану оболонки, зумовлені зміною температурних кліматичних впливів. Виконані дослідження температурних полів оболонок сховищ на моделях та натурних об'єктах дозволили обґрунтувати завдання температурного поля циліндричних оболонок сховищ рядами Фур'є.

Одностороннє сонячне нагрівання повністю освітленої сонцем циліндричних оболонок сховищ наводить у стінці оболонки плоске, симетричне щодо нормалі падіння сонячних променів, температурне поле, яке можна представити рядом Фур'є з п'ятьма членами ряду розкладання по косинусах. За наявності поруч розташованої з оболонкою споруди, яка закриває по всій висоті половину оболонки в окружному напрямку, температурне поле описується рядом Фур'є, що містить по 10 гармонік розкладання по синусах і косинусах.

Мала товщина оболонки, значний радіус кривизни оболонок, великий коефіцієнт температуропровідності металів забезпечують малу мінливість температури оболонки по товщині, можливість опису напружено-деформованого стану оболонки безмоментну теорію і простий крайовий ефект.

Отримані у рядах Фур'є формули для зусиль безмоментного стану, нев'язки якого в стиках поясів оболонки різної товщини та в опорних зонах ліквідуються простим крайовим ефектом.

**Ключові слова:** безмоментна теорія оболонок, теорія крайового ефекту, температурні кліматичні впливи, сили та переміщення в порожній вертикальній циліндричній оболонці.

Стаття надійшла до редакції 27.02.2023

**ASSESSMENT OF THE STATE OF STRESS AND DEFORMATION OF METAL  
CORRUGATED PIPE STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT ITS DIAMETER  
AND THICKNESSES OF THE CORRUGATED SHEET**

**Karnakov I.**, postgraduate student,  
ihor.karnakov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8751-9934  
*National Transport University*  
Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010

**Kovalchuk V.**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
kovalchuk.diit@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4350-1756  
*Lviv Polytechnic National University*  
Street Stepana Bandery, 12, Lviv, 79013

**Onyshchenko A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1040-4530  
*National Transport University*  
Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010

**Abstract.** The analysis of research works on the assessment of the stress-strain state of prefabricated metal corrugated structures of transport facilities was performed. It was established that the stresses and deformations of structures made of ZMGK depend on a complex of influencing factors: the amount of static and dynamic loads, the height of the backfill above the vault of the structure, the parameters of corrugation waves, etc. However, the interconnected effect of the pipe diameter and the thickness of the metal corrugated sheet on the stresses that occur in the metal pipe structures has not been established.

The object of research is metal corrugated pipe constructions. To assess the stress state of the pipe, the influence on the stress of the cross-section of the pipe and the thickness of the metal corrugated sheet of the structure are taken into account.

It was established that the geometric parameters of the cross-section of the pipe and the thickness of the metal corrugated sheet of the structure have a significant influence on the stress state of metal corrugated pipe structures. When the diameter of the pipe increases, the amount of stress that occurs in metal structures increases. However, with an increase in the thickness of the corrugated sheet, the amount of stress, with the same pipe diameter, decreases. Increasing the thickness of the sheet from 3.0 mm to 7.0 mm leads to a decrease in the stresses in the pipe metal by 50.39%. When the diameter of the pipe changes from 1.0 m to 6.0 m with a metal thickness of the corrugated sheet equal to 3.0 mm, the magnitude of the stresses increased by 7.38 times, with a sheet thickness of 4.0 mm – by 7.8 times, with a thickness of 5.0 mm sheet – 8.08 times, 6.0 mm sheet thickness – 8.28 times, and 7.0 mm corrugated pipe sheet thickness – 8.43 times.

It was established that the gradual increase in the thickness of the corrugated sheet of the structure leads to a decrease in the stress difference between the previous thickness of the sheet and the increased one. With a pipe diameter of 6.0 m, the stress difference that occurs when the thickness of the corrugated sheet is 3.0 mm and 4.0 mm is 21.35 MPa, with a thickness of 4.0 mm and 5.0 mm, the stress difference is 14.16 MPa, at 5.0 mm and 6.0 mm, the difference in stress values is 10.25 MPa, and with increased sheet thickness from 6.0 mm to 7.0 mm, the difference in stress values is 7.76 MPa.

The obtained results of the stress state of prefab metal corrugated pipe structures can have practical application in the case of acceptance of the technical and economic justification, regarding the determination of the pipe diameter and the thickness of the metal corrugated sheet of the structure. One of the limitations of the application of these research results is the assessment of the stress state of the pipe made of prefabricated metal corrugated structures with the parameters of the corrugated waves of 150×50 mm. Other parameters of corrugation waves are not taken into account in this study.

**Keywords:** prefabricated metal corrugated structures, pipe, tension.

**Introduction.** Transport constructions made of prefabricated metal corrugated structures (hereinafter referred to as PMCS) are successfully used in transport construction. There are built culverts, tunnel-type overpasses, small bridges, bio-crossings, pedestrian crossings, etc. on the communication routes made from prefabricated metal corrugated structures. The constructions of PMCS are widely used in the European Union [1-4]. Well-known manufacturers of metal corrugated structures are the Norwegian-Swedish-Finnish company ViaCon [1], the Canadian company ARMTEC [3], and the company FRACASSO [4].

In Ukraine, several PMCS constructions have been built, for example, the tunnel overpass in Kropyvnytsky [5], a culvert on the Vadul-Siret-state border section of the railway track in the shape of a horizontal ellipse with axes of 6.57 m and 6.20 m [6] (Fig. 1). The transport tunnel on 228 + 160 km of the Kyiv-Kharkiv-Dovzhansky highway, the transport tunnel on the bypass in Odessa, the transport tunnel on a bypass in Donetsk using structures SuperCor SC 86 s [7], the construction in the village of Fructove in the Autonomous Republic of Crimea, the PMC transport structure on the Kyiv-Odesa Highway at 169+292 km [8, 9] and a number of PMC structures on the other roads of Ukraine.

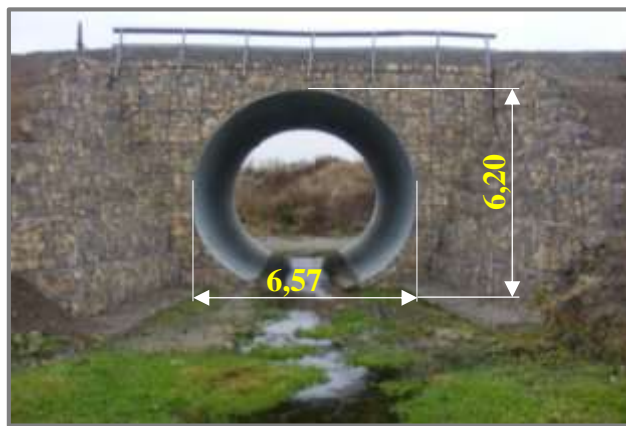


Fig. 1. A pipe made of metal corrugated structures

A PMC tunnel-type overpass built in Kropyvnytsky is of a large cross-section size. The construction is 9.23 m wide and 8.12 m high. The length of the overpass under the railway track is 34.19 m. At the same time, the width of the highway in the overpass is 5.5 m.

**The problem and its relevance.** On operating the constructions made of prefabricated metal corrugated structures, they are exposed to a variety of influences. As a result, the constructions suffer a variety of damages. In addition, the durability of constructions made of PMCS depends on compliance with the technological conditions of the ground compaction backfill device and ensuring anti-corrosion protection of metal structures.

It should be noted that in the practice of constructing PMC structures, there are cases that residual deformations of vertical and horizontal axes that occurred during the initial service life [6]. Therefore, to ensure the load-bearing capacity of structures, multivariate calculations should be carried out regarding to the influence of a complex of factors on the load-bearing capacity of constructions made of prefabricated metal corrugated structures. The transverse rigidity of individual PMCS elements is provided due to the thickness of the elements and their wavy corrugated shape. This study presents the results of estimating the stresses that occur in metal structures, taking into account the pipe diameter and thickness of the metal corrugated sheet.

**Analysis of recent research and publications.** Today, there are a number of scientific papers on studies of the stress-strain state of PMC structures [10-16]. In scientific works [10, 11], it is indicated that constructions made of metal corrugated structures have high reliability. Since experimental tests of constructions have shown that PMC structures are able to withstand loads 2.5 times higher than the calculated ones. Also, the results of experimental studies of the stress-strain state of PMC structures are given in the works [13, 14].

In [12], it is indicated that it is difficult to estimate the actual stresses and deformations of metal structures during the construction of structures, especially when compacting the ground backfill of structures.

In [15, 16], the results of estimating the stress-strain state of PMC structures are presented, taking into account the influence of the degree of compaction of ground backfill. It is established that only with the standard degree of compaction, the load-bearing capacity and durability of such structures are ensured. In the case of an insufficient degree of compaction in the metal of the structures, stresses may develop that exceed the allowable stresses.

From the analysis of research, it was found that PMC structures have advantages over concrete and reinforced concrete constructions. Most scientific works are related to studying PMC structures, taking into account the impact of loads from vehicles and taking into account the physical and mechanical parameters of the sealing backfill. The problems of estimating the stress-strain state of PMC structures, taking into account the geometric parameters of structures, have not been sufficiently developed. This would give practical results regarding the feasibility of using the structures of a certain cross-section size. Therefore, the work conducts a study on the influence of the cross-section of a PMC pipe and the thickness of a corrugated metal sheet on the stress-strain state of structures.

**The research purpose** is an assessment of the stress-strain state of metal corrugated structures of the construction, depending on the size of the cross-section of the pipe and the thickness of the metal corrugated sheet.

**Materials and methods of the research.** To study the stress-strain state of a PMC pipe, we consider the geometric model shown in Fig. 2. To study the features of the stress-strain state of a pipe made of metal corrugated structures, a study of stresses that occur in metal structures depending on the diameter of the structure and the thickness of the metal corrugated sheet of the structure was conducted. A corrugated pipe with 150×50 mm corrugation wave parameters was taken in the study. In this case, the thickness of the corrugated sheet is assumed to be from 3.0 mm to 7.0 mm. The backfill height above the metal pipe arch is 2.0 m. The maximum pipe diameter is assumed 6.0 m, and the minimum is 1.0 m.

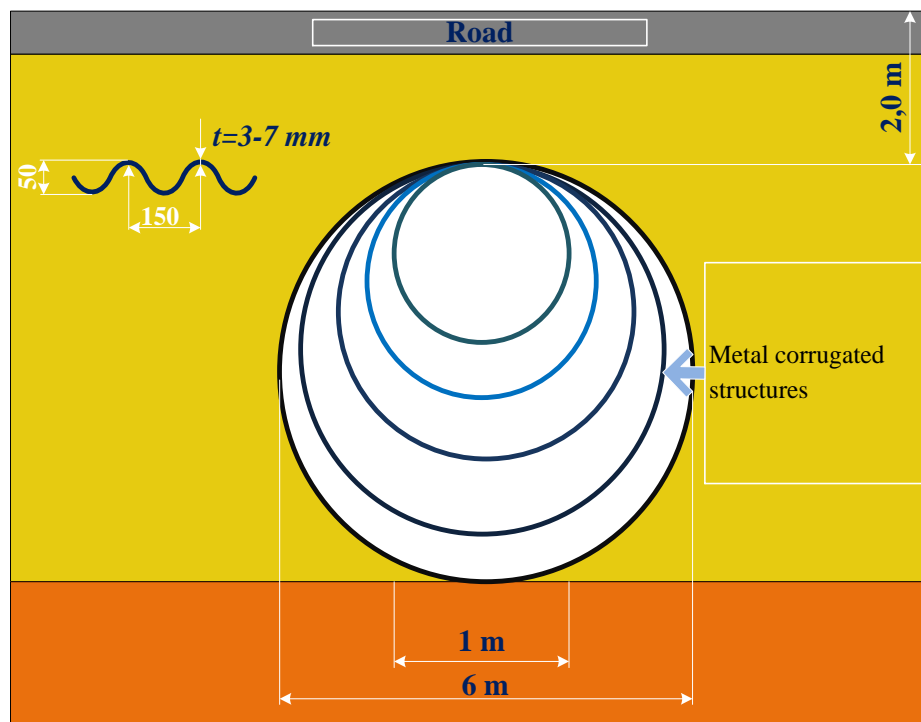


Fig. 2. Calculation scheme for assessing the stress-strain state of a pipe made of metal corrugated structures

Geometric and physical and mechanical parameters of metal corrugated structures and ground compacting backfill are given in Table 1.

Table 1 – Geometric and physical and mechanical parameters of the PMC pipe used in the calculation

No	Parameter name	Dimension	Parameter value
<b>Data on prefabricated metal corrugated structures</b>			
1	Pipe diameter	m	From 1.0 m to 6.0 m, in 0.5 m increments
2	Geometric parameters of wave corrugation of metal pipe structures	mm	150×50
3	PMC thickness	mm	3.0; 4.0; 5.0; 6.0; 7.0
4	Elastic modulus of steel	MPa	$2.1 \times 10^5$
5	Poisson's ratio of construction material	-	0.25
6	Specific gravity of the PMC material	kN/ m <sup>3</sup>	78
<b>Data on soil compaction backfill</b>			
7	Specific gravity of backfill soil	kN/ m <sup>3</sup>	21
8	Backfill soil deformation modulus	MPa	82
9	Distance from the top of the pipe to the bottom of the road surface	m	1.8
<b>Load data</b>			
10	Equivalent load	kN/ m	182
11	Overload coefficients	-	$n=1.3; n_1=1.1$

It should be noted that the thickness of the corrugated sheet of the structure also depends on the area of the corrugation wave, which is taken from reference data according to [17].

To check the load-bearing capacity of a pipe made of prefabricated metal corrugated structures, the method given in [17] was used. The load-bearing capacity of metal corrugated structures is checked by the formula:

$$\frac{N}{A} \leq R_y m, \tag{1}$$

where is the normal (tangential) force  $N$  in a corrugated structure from the design loads per length  $\lambda$  one corrugation is determined by the formula:

$$N = \frac{\gamma \cdot n \cdot D \cdot \left( h_{eq} + h + \frac{D}{2} \right) \cdot \lambda}{2 + \frac{E_0}{E} \cdot \frac{D}{\delta} \cdot (1 - \nu^2)} + \frac{\gamma_{sh} n_1 \delta \frac{D}{2} \lambda}{1 + \frac{\delta^2}{3D^2}}. \tag{2}$$

An explanation of the values given in formulas (1) and (2) is given in [17].

**Presentation of the main research material.** The results of assessing the stress state of metal structures depending on the diameter of the PMC pipe and the thickness of the metal sheet of structures are given in Table 2.

From the calculation results performed (Table 2) it is established that the values of stresses that occur in metal corrugated structures depend on the pipe diameter. Thus, with a metal sheet thickness of 3 mm and a pipe diameter of 1.0 m, the stress value is 14.61 MPa, with a diameter of 2.0 m – 30.86 MPa, with a diameter of 4 m – 67.33 MPa, with a diameter of 5 m – 87.17 MPa and with a diameter of 6 m – 107.89 MPa.

The value of stresses increases with increasing the diameter of the PMC pipe. When changing the pipe diameter from 1.0 m to 6.0 m with a metal thickness of the corrugated sheet equal to 3.0 mm, the stress value increased by 7.38 times, with a sheet thickness of 4 mm – by 7.8 times, with a sheet thickness of 5 mm – by 8.08 times, with a sheet thickness of 6 mm – by 8.28 times and with a corrugated sheet thickness of 7 mm – by 8.43 times.

Table 2 – The studies' results of the stress state of metal corrugated pipe structures

Structure diameter, m	Thickness of metal corrugated sheet structures with parameters of corrugation waves 150×50 mm				
	3	4	5	6	7
	Voltage, MPa				
1.0	14.61	11.09	8.96	7.51	6.45
1.5	22.55	17.24	13.98	11.75	10.12
2.0	30.86	23.75	19.33	16.29	14.06
2.5	39.52	30.59	25.01	21.12	18.26
3.0	48.5	37.76	30.98	26.23	22.72
3.5	57.78	45.23	37.23	31.6	27.43
4.0	67.33	52.99	43.77	37.24	32.37
4.5	77.13	61.01	50.56	43.11	37.55
5.0	87.17	69.28	57.59	49.23	42.94
5.5	97.42	77.79	64.88	55.57	48.55
6.0	107.89	86.54	72.38	62.13	54.37

In addition, the amount of stress is also affected by the thickness of the metal corrugated sheet of the pipe. Let us analyze the stress value for the smallest and largest pipe diameters. And so with a pipe diameter of 1.0 m and a corrugated sheet thickness of 3 mm, the stress value is 14.61 MPa, with a sheet thickness of 4 mm – 11.09 MPa, with a sheet thickness of 5 mm – 8.96 MPa, with a sheet thickness of 6 mm – 7.51 MPa and with a corrugated pipe sheet thickness of 7 mm, the stress value is 6.45 MPa.

With the maximum diameter of a pipe made of prefabricated metal corrugated structures, equal to 6.0 m, which is taken in the calculations, with a thickness of a corrugated sheet of 3 mm, the stress value is 107.89 MPa, with a sheet thickness of 4 mm – 86.54 MPa, with a sheet thickness of 5 mm – 72.38 MPa, with a sheet thickness of 6 mm – 62.13 MPa and with a thickness of a corrugated pipe sheet of 7 mm, the stress value is 54.37 MPa.

Fig. 3 shows the graphical dependence of stresses on the diameter of a construction made of prefabricated metal corrugated structures and the thickness of a metal corrugated sheet of the structure.

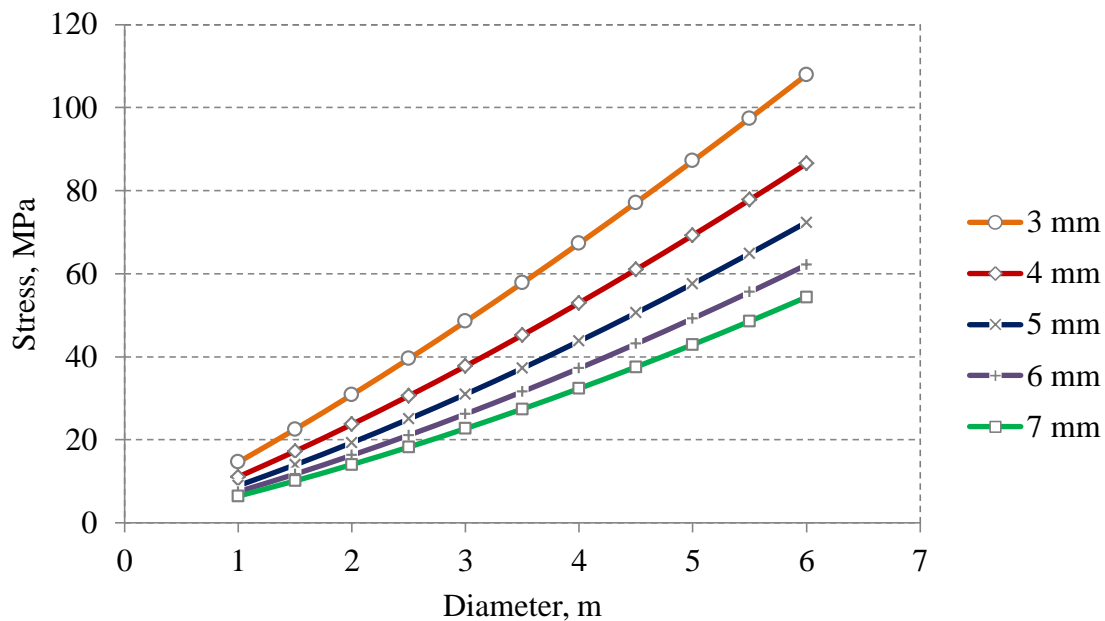


Fig. 3. Graph of stress dependence in metal corrugated structures on the diameter of the construction and the thickness of the metal corrugated sheet

From Fig. 3 it can be seen that with an increase in the thickness of the corrugated sheet of the structure, with the same pipe diameter, the value of stresses changes. Increasing the thickness of the corrugated sheet leads to a decrease in stresses in the pipe metal. It was found when the sheet thickness increased from 3 mm to 7 mm, the stress value decreased by 50.39 %.

However, it should be noted that if we analyze the stress values, for example, with a pipe diameter of 6.0 m and different values of the thickness of the corrugated sheet, we can see in Fig. 3, that the stress difference when changing the thickness of the corrugated sheet from 3.0 mm to 4.0 mm is higher than when changing from 4.0 mm to 5.0 mm and so on. That is, a gradual increase in the thickness of the corrugated sheet of the structure leads to a decrease in the stress difference between the previous thickness and the increased one. And so when the sheet thickness was increased from 3.0 mm to 4.0 mm, the stress value decreased by 21.35 MPa, from 4.0 mm to 5.0 mm, the stress value decreased by 14.16 MPa, from 5.0 mm to 6.0 mm, the stress value decreased by 10.25 MPa, and when the sheet thickness was increased from 6.0 mm to 7.0 mm, the stress value decreased by 7.76 MPa.

**Conclusions.** As a result of calculations of stresses that occur in metal pipe structures, taking into account the cross-section of the pipe and the thickness of the metal corrugated sheet, the following conclusions are obtained:

1. It is established that the magnitude of stresses that occur in metal corrugated pipe structures depends on the size of the pipe diameter and the thickness of the metal corrugated sheet of the structure. With a metal sheet thickness of 3.0 mm and a pipe diameter of 1.0 m, the stress value is 14.61 MPa, with a diameter of 2.0 m – 30.86 MPa, with a diameter of 4.0 m – 67.33 MPa, with a diameter of 5.0 m – 87.17 MPa and with a diameter of 6.0 m – 107.89 MPa.

2. The results of the research have shown that the magnitude of stresses increases with increasing the diameter of pipes made of precast metal corrugated structures. When changing the pipe diameter from 1.0 m to 6.0 m with a metal thickness of the corrugated sheet equal to 3.0 mm, the stress value increased by 7.38 times, with a sheet thickness of 4.0 mm – by 7.8 times, with a sheet thickness of 5.0 mm – by 8.08 times, with a sheet thickness of 6.0 mm – by 8.28 times and with a corrugated sheet thickness of 7.0 mm – by 8.43 times.

3. It is established that the value of stresses decreases with increasing the thickness of the metal corrugated pipe sheet. With a pipe diameter of 1.0 m and a corrugated sheet thickness of 3.0 mm, the stress value is 14.61 MPa, with 4.0 mm – 11.09 MPa, with 5.0 mm – 8.96 MPa, with 6.0 mm – 7.51 MPa and with a corrugated pipe sheet thickness of 7.0 mm, the stress value was 6.45 MPa.

## References

- [1] Kompaniia ViaCon. [Online]. Available: <http://viacon.ua/gallery.html>. Accessed on: May 19, 2022.
- [2] P.M. Koval, I.P. Babiak, T.M. Sitdykova, "Normuvannia pry proektuvanni i budivnytstvi sporud z metalevykh hofrovanykh konstruksii", *Visnyk Dnipropetr. nats. un-tu zal. transp. im. ak. V. Lazariana*, no. 39, pp. 114–117, 2010.
- [3] ARMTEG/Gonsiraction Products; 15 Campbell Road, P:0; Box3000, Ontario, N1H6P2.
- [4] Fracasso. Catalogo Generale. Metalmeccanica Fracasso SpA, Italy, MOD.301/1000/3.2001/LP.
- [5] Vitalii Kovalchuk, Maksym Koval, Artur Onyshchenko, Ivan Kravets, Olena Bal, Ruslan Markul, Svitlana Vikhot, Oleksiy Petrenko, Roman Rybak, Andriy Milyanych, "Determining the strained state of prefabricated metal corrugated structures of a tunnel overpass exposed to the dynamic loading from railroad rolling stock", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 3/7(117), pp. 50–58, 2022.
- [6] B.M. Stasiuk, V.Z. Stankevych, V.V. Kovalchuk, Y.Y. Luchko, "Doslidzhennia napruchenodeformovanoho stanu metalevykh hofrovanykh konstruksii pry vzaємodii z gruntom zasypky", *Zbirnyk nauk. prats Dnipropetrovskoho nats. un-tu zalizn. transportu*

- im. akadem. V. Lazariana «Mosty ta tuneli: Teoriia, doslidzhennia, praktyka»*, vyp. 5, pp. 105–111, 2014.
- [7] V.V. Kovalchuk, P.M. Koval, M.P. Koval, "Metody obstezhennia ta vyprovovuvannia tunelnogo shliakhoprovodu z metalevykh hofrovanykh konstruksii na km 228+160 avtomobilnoi dorohy Kyiv–Kharkiv–Dovzhanskyi", *Dorohy i mosty*, vyp. 21, pp. 250–269, 2020.
- [8] P.M. Stashuk, I.P. Babiak, T.M. Sitdykova, "Naukovo suprovid sporudzhennia hofrovanoi konstruksii prohomom 12 m na obkhodi m.Olesko u Lvivskii oblasti", *Dorohy i mosty*, vyp. 9, pp. 242-247, 2008.
- [9] P.M. Koval, I.P. Babiak, T.M. Sitdykova, "Normuvannia pry proektuvanni i budivnytstvi sporud z metalevykh hofrovanykh konstruksii", *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*, no. 39, pp.114–117, 2010.
- [10] L. Korusiewicz, B. Kunecki, "Behaviour of the steel box-type culvert during backfilling", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. XI, no. 3, pp. 638–650, 2011.
- [11] A.C. Mak, R.W.I. Brachman, I.D. Moore, "Measured response of a deeply corrugated box culvert to three dimensional surface loads", *Transportation Research Board Annual Conference*, Washington D.C., Paper no. 09-3016, 14 p, 2009.
- [12] T. Maleska, D. Beben, "Behaviour of corrugated steel plate bridge with high soil cover under seismic excitation", *MATEC Web of Conferences*, 174, 04003, p.1–11, 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817404003>.
- [13] C. Machelski, L. Korusiewicz, "Deformation of buried corrugated metal box structure under railway load. *Roads and Bridges*", *Dorogi i Mosty*, 16, 3, pp. 191–201, 2017. DOI: 10.7409/rabdim.017.013.
- [14] D. Beben, "Experimental Testing of Soil-Steel Railway Bridge Under Normal Train Loads. Experimental Vibration Analysis for Civil Structures", *Lecture Notes in Civil Engineering* 5, pp. 805 – 815, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-67443-8\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-319-67443-8_71).
- [15] V. Kovalchuk, R. Markul, A. Pentsak, B. Parneta, O. Gajda, S. Braichenko, "Study of the stressstrain state in defective railway reinforcedconcrete pipes restored with corrugated metal structures", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/1 (89), pp. 37–44, 2017. doi: DOI: 10.15587/1729-4061.2017.109611.
- [16] Vitalii Kovalchuk, Yuri Kovalchuk, Mykola Sysyn, Volodymyr Stankevych, Oleksiy Petrenko, "Estimation of carrying capacity of metallic corrugated structures of the type multiplate mp 150 During interaction with backfill soil", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/1 (91), pp. 18–26, 2018. doi: 10.15587/1729-4061.2018.123002.
- [17] Posibnyk do VBN V.2.3-218-198:2007. Sporudy transportu. Proektuvannia ta budivnytstvo sporud iz metalevykh hofrovanykh konstruksii na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia. K., 2007.

**ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВИХ  
ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТРУБИ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ЇЇ ДІАМЕТРУ  
ТА ТОВЩИНИ ГОФРОВАНОГО ЛИСТА**

**Карнаков І.А.**, аспірант,  
ihor.karnakov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8751-9934  
*Національний транспортний університет*  
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна

**Ковальчук В.В.**, д.т.н., доцент,  
kovalchuk.diit@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4350-1756  
*Національний університет «Львівська політехніка»*  
вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

**Онищенко А.М.**, д.т.н., професор,  
onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1040-4530  
*Національний транспортний університет*  
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна

**Анотація.** Виконано аналіз науково-дослідних робіт із оцінки напружено-деформованого стану збірних металевих гофрованих конструкцій транспортних споруд. Встановлено, що напруження та деформації споруд із збірних металевих гофрованих конструкцій залежать від комплексу факторів впливу: величини статичних та динамічних навантажень, висоти засипки над склепінням конструкції, параметрів хвиль гофр тощо. Однак не встановлено взаємопов'язаного впливу величини діаметру труби і товщини металевих гофрованих листів на напруження, які виникають у металевих конструкціях труби.

Об'єктом досліджень є металеві гофровані конструкції труби. Для оцінки напруженого стану труби враховано вплив на напруження величини поперечного перетину труби та товщину металевих гофрованих листів конструкції.

Встановлено, що значний вплив на напружений стан металевих гофрованих конструкцій труби мають геометричні параметри поперечного перетину труби та товщина металевих гофрованих листів конструкції. При збільшенні діаметру труби величина напружень, які виникають у металевих конструкціях, зростає. Однак, при збільшенні товщини гофрованого листа, величина напружень, при одному і тому ж діаметрі труби, знижується. Збільшення товщини листа від 3,0 мм до 7,0 мм призводить до зменшення напружень у металі труби на 50,39 %. При зміні діаметру труби від 1,0 м до 6,0 м при товщині металу гофрованого листа рівній 3,0 мм, величина напружень збільшилася у 7,38 рази, при товщині листа 4,0 мм – у 7,8 рази, при товщині листа 5,0 мм – у 8,08 рази, при товщині листа 6,0 мм – у 8,28 рази та при товщині гофрованого листа труби 7,0 мм – у 8,43 рази.

Встановлено, що поступове підвищення товщини гофрованого листа конструкції призводить до зменшення різниці напружень між попередньою товщиною листа і збільшеною. При діаметрі труби 6,0 м різниця напружень, яка виникає при товщині гофрованого листа 3,0 мм і 4,0 мм складає 21,35 МПа, при товщині 4,0 мм та 5,0 мм різниця величин напружень складає 14,16 МПа, при 5,0 мм та 6,0 мм різниця величин напружень складає 10,25 МПа та при підвищенні товщини листа від 6,0 мм до 7,0 мм різниця величин напружень складає 7,76 МПа.

Отримані результати напруженого стану збірних металевих гофрованих конструкцій труби можуть мати практичне застосування у випадку прийняття техніко-економічного обґрунтування, щодо призначення діаметру труби та товщини металевих гофрованих листів конструкції. Одним із обмежень застосування даних результатів досліджень є оцінка напруженого стану труби виготовленої із збірних металевих гофрованих конструкцій із параметрами хвиль гофр 150×50 мм. Інші параметри хвиль гофр у даному дослідженні не враховано.

**Ключові слова:** збірні металеві гофровані конструкції, труба, напруження.

Стаття надійшла до редакції 19.01.2023

**BUILDING COMPOSITES AS OBJECTS OF SYSTEM ANALYSIS**

<sup>1</sup>**Kolesnykov A.V.**, Ph.D., Associate Professor,  
kolesnikovandrey2791@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8737-0933

<sup>1</sup>**Semenova S.V.**, Ph.D., Associate Professor,  
semenovablacksea@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5309-5854

<sup>1</sup>**Vyrovoy V.M.**, Dr. Science, Professor,  
vyrovoy@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8818-4112

<sup>1</sup>**Oliinyk T.P.**, Ph.D., Assistant Professor,  
tanoley@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4469-6797

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

**Abstract.** The article is devoted to the consideration of the material science problems from the standpoint of the general systems theory. The method of dialectical pairs "part-whole", "continuous-discrete" and "randomness-necessity" is used, corresponding to the general system coordinates, on the basis of which the third emergent component of a synthetic nature arises. System-theoretic methods make it possible to concretize model representations using elements of the crystallization theory of dynamic information theory. System representations are used to refine the concept of an interface in materials and heterogeneous systems. The dialectical unity of atomistic and geometric concepts in the theory of the formation of a new phase in binders is shown. The probabilistic and informational description is considered as a realization of the dialectical pair "randomness-necessity". The concept of information is closely related to choosing one or more options from many and remembering the choice made. The choice can be made as a result of the action of external forces (information reception) or due to the unstable behavior of the system (the emergence of new information). The process of structure formation can be considered as the dynamics of an information system. The dynamics of the information system should include interactions that provide any structure-forming particle with the possibility of transition between the areas of influence of stable states with subsequent attraction to one of them. The formation of structures in a binder from the position of dynamic information theory is considered as the reception of information. It is necessary to perform work, due to which the system will go into one of the stable states for the reception of information. The formation of new elements and structures – pores, capillaries and cracks is considered as a transition of the system to its own potential minima – the epigenetic landscape of the material as an emerging system. In this case, part of the energy will be lost in the process of dissipation, and the physical entropy will increase by a value exceeding the amount of information received. Such an effect can be considered as the "price" of the observed macroscopic process of self-organization. The involvement of systems theory also helps, on the basis of the principle of adequacy, to indicate the way for choosing a model object that is optimal for studying the processes of structural transformations of a material.

**Keywords:** composite building materials, dispersed systems, system approach, structure formation, dialectical pairs.

**Introduction.** Composite building materials (CBM) are presented as open complex non-equilibrium systems in modern materials science [1]. The properties of such materials, including structural-mechanical ones, can be described by several methods. In the first category of methods, spatial averaging techniques are applied (averaging over structural components) and a transition is made to the reduced characteristics, such as the modulus of elasticity or shear. In the second category of research methods, a significant departure from the concept of a material as a continuous medium is made, which corresponds to the results of modern studies of structural-mechanical and

physical-chemical properties [1]. Since it is rather difficult to find among a set of mathematical models and representations strictly suitable for reflecting new facts based on a structure-oriented approach, many mathematical models of various types, both continuous and discrete, are used in this area [1-4]. For the same reason, when studying the behavior of such systems, a verbal description is often used [1, 5].

**Analysis of recent research.** To describe the properties of systems of the type under consideration, it can be considered productive to apply the principles of the self-organization theory, as well as the general systems theory [1]. The wide possibilities of these methods can be applied to specific categories of materials. In particular, the multivariate behavior and properties of CBM, for example, mineral or polymeric materials, are in good agreement with the wide possibilities of the methods under consideration. This work is devoted to the analysis of the possibilities of applying the corresponding methods to composite materials of the two types considered.

One view of general systems theory is that it is a more concrete embodiment of the dialectic [5]. In systems theory, any object can be represented in a kind of coordinate space, each axis of which corresponds to a dialectic pair (DP). The considered system or approach in this case is a compromise, and sometimes a non-trivial synthesis, and complements pairs to triads. The dialectical theory of systems is, by necessity, explicitly or implicitly, ternary, triadic. Some dialectical pairs and their dialectical synthesis seem to be especially important for the problems of materials science.

**Targets and goals.** The purpose of this work is to increase the interpretative power and predictive ability of traditional physical and chemical methods of building materials science by using together with them methods based on the general systems theory, and to apply the built version of the system approach for the theoretical study of mineral and polymer composite materials. The corresponding tasks are, according to the applied method, the selection of the most important dialectic pairs and the disclosure of their content using the statistical theory of solidification of composite materials and dynamic information theory.

**Objects and methods of research.** The objects of research are the composite materials based on mineral (gypsum) and polymeric binders, considered as systems. In this case, a system is understood as a secondary integrity that arises when primary, relatively integral objects are combined, accompanied by the emergence of new properties in this association that are not reducible to the original ones. Methods for studying objects of materials science as systems are hierarchical. The upper, structural-logical level, is associated with the use of dialectical system methodology. This abstract level is concretized with the help of probabilistic methods of solidification theory and information theory, which allow one to proceed to specific recommendations on the choice of objects and methods of experimental research based on the adequacy principle.

**Research results.** The analysis of structure formation processes in this work is carried out in accordance with the following algorithm. At the first stage, with the help of system-theoretical representations, a set of dialectical pairs is distinguished, each of which is represented by one of the "coordinate axes" that allow classifying materials and the processes occurring in them. It is determined what is a dialectical synthesis for each direction. Then, the considered structural-logical approaches are concretized using a number of physical-chemical methods. In accordance with this plan, the following dialectic pairs (DP) are considered.

*DP "part-whole".* Such a pair is determined by a compromise in establishing the boundary between the system and the environment, i.e. by specifying a surface bounding the system. This surface also provides all kinds of interactions with the environment. Thus, a mineral or polymer binder, taking into account its intended purpose (functioning in a structure), can be considered as an open hierarchical system with its own scale levels, at each of which the issue of the interface has its own special aspects. At the micro level, a binder material, for example, gypsum stone, is a polycrystalline body, which also includes a finely crystalline component [6], in which irregularly shaped crystals are linked into a network crystallization structure. The resulting structure often has the character of a percolation cluster [3], and its boundaries coincide with the surfaces of the sample under study. The description of the structure of other materials, for example, polymer compositions, is qualitatively similar at the level of cluster structural units [7]. One of the reasons for the qualitative similarity is the

systemic separation of structural levels, for example, the separation of the macroscopic level from the molecular level. In this case, a qualitatively similar behavior at the macro level arises despite the significantly different molecular structure of the materials. In the study of such structures, the problem of the interface is solved by constructing a cellular partition of a three-dimensional space and calculating cellular characteristics that turn into dimensional ones for extremely small cell sizes. In this case, the surface, linear, and point features included in the system are naturally taken into account. From a macroscopic point of view, the material should be considered in operational conditions – as a structural element [1] or by fixing the boundary conditions at the interface of the corresponding blocks.

The problem of the existence of an interface can also, in turn, be representable by a DP. On the one hand, the classical model representation is the model of the interface as a smooth surface, the intersection of which is accompanied by an abrupt change in the properties of the corresponding phases. On the other hand, the atomic and molecular structure of the corresponding composites makes it possible to represent the material in the form of a continuous network structure, and the formation of individual structural blocks (clusters) is associated with an increase or a maximum decrease in the number of bonds in a molecular or polycrystalline network (Fig. 1). With such a structure, it is difficult to speak of an interface as such.

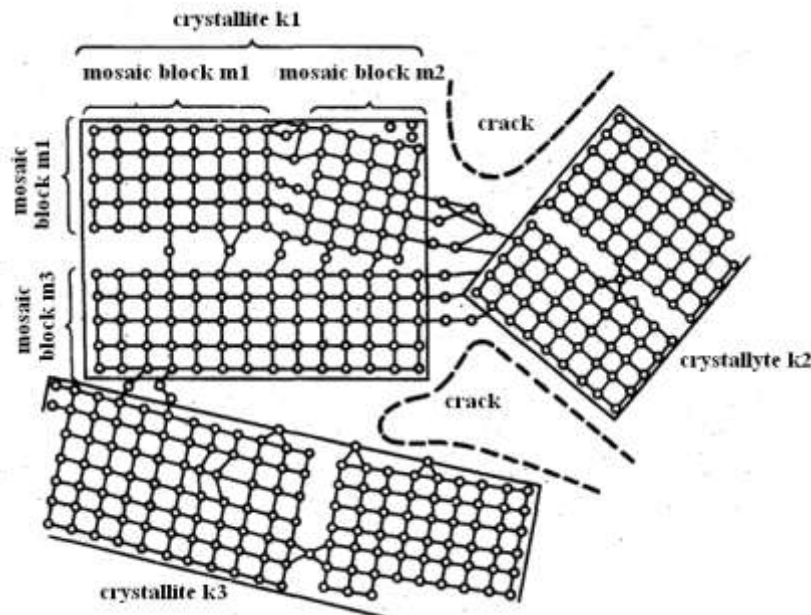


Fig.1. Representation of the material as a mesh polystructure

*DP "continuous-discrete"*. For various reasons, a universal feature manifests itself - a tendency to grouping in space with the formation of structures, as well as in time, with the formation of consistent tempo-rhythms and being synchronized, for all material formations from molecules to organisms. The space-time structures formed in materials have the ability to interact with each other to form a superstructure. Particles of material, forming hierarchical fractal-like systems in space, "filling" the space and modeling a continuous medium, are characterized by both discreteness and continuity. This dialectical pair is one of the most essential for material systems. For different spatial scales, the mechanisms of formation of structures are different, but here, too, similarity considerations remain valid. Another version of theories going from continuous to discrete is the representation of discrete objects as spatially separated maxima of the concentration or distribution function [2].

To study the process of hydration, which occurs simultaneously with structure formation in a binder dough, for example, based on gypsum, the state of the near-surface layers of crystals of the initial binder  $\text{CuSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$  is extremely important. This is one of the factors determining the further course of the process – the predominance of topochemical processes of hydration, as a result of which the formation of a finely crystalline product is likely, or the path associated with the dissolution of the binder, the transfer of ions through a layer of saturated solution, nucleation and

recrystallization according to Le Chatelier-Rehbinder [4]. Here, as in the process of interaction of a binder with surface-active additives, the molecular level of structure organization is important. The processes occurring at the interfaces of different scale levels are decisive in the formation of the structure of polymer composites [8, 9].

The next level of structure-forming processes in terms of scale is directly related to the formation of a new phase nuclei from a supersaturated solution and their growth [10]. Most mathematical models do not take into account the structure of nuclei and consider the evolution of the distribution of nuclei by the number of atoms included in them  $n, n \gg 1$ . At the same time, at each stage, the attachment of new atoms to the nucleus is associated with the fluctuation passage of a large number of intermediate states – "active complexes", each of which corresponds to different free energy maxima  $\Delta F$ . Consideration of structures of this type is carried out using the theory of Markov processes, taking into account the possibility of transition to the nearest intermediate state. Kolmogorov's equations are an adequate mathematical apparatus. For the number of nuclei  $Z(n, t)$  containing  $n$  atoms by time  $t$  we have (1):

$$\frac{\partial Z(n, t)}{\partial t} = -Z(n, t)[P_+(n) + P_-(n)] + Z(n-1, t)P_+(n-1) + Z(n+1, t)P_-(n+1), \quad (1)$$

here  $P_+(n)$  and  $P_-(n)$  are the probabilities of addition and detachment of an atom for a nucleus with size  $n$ .

Neglecting in (1) terms above the second order of smallness allows us to proceed to the diffusion process and the Fokker-Planck equation (2):

$$\frac{\partial Z(n, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial n^2} \{ [P_-(n) + P_+(n)] Z(n, t) \} + \frac{\partial}{\partial n} \{ [P_-(n) - P_+(n)] Z(n, t) \}. \quad (2)$$

If we assume that the intermediate states are in equilibrium with the solution (a small number of nuclei formed), the principle of detailed equilibrium (3) arises:

$$\begin{aligned} b(n)P_+(n) &= b(n+1)P_-(n+1) \\ b(n)P_-(n) &= b(n+1)P_+(n+1) \end{aligned} \quad (3)$$

here  $b(n)$  – is the equilibrium distribution function (4):

$$b(n) = N \exp \left\{ -\frac{\Delta F(n)}{kT} \right\}. \quad (4)$$

From (1) and (3) in approximation (5):

$$\frac{\partial P_{\pm}(n)}{\partial n} \langle \langle P_{\pm}(n) \rangle \rangle, \quad (5)$$

we can derive the Zeldovich equation (6) [10]:

$$\frac{\partial Z(n, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial n} \left[ P_+(n) b(n) \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{Z(n, t)}{b(n)} \right) \right]. \quad (6)$$

The transition state method for the probabilities of adding and removing an atom  $P_{\pm}(n)$  gives approximation (7):

$$P_{\pm}(n) = \tilde{n} \omega \exp \left\{ -\frac{U}{kT} \mp \frac{1}{2kT} \frac{d\Delta F}{dn} \right\}, \quad (7)$$

where  $\tilde{n}$  – is the number of atoms near the surface of the nucleus,  $\omega$  – is the oscillation frequency near the surface of the nucleus,  $U$  – is the average height of the activation maximum.

The critical nucleation concentration (CCN), which is traditional for the macroscopic description of formation and growth, enters the stochastic description through the quantities  $\tilde{n}$  and  $P_{\pm}(n)$  from (7).

At a certain size  $n^*$ , the free energy reaches a maximum (8), which corresponds to the critical size of the nucleus:

$$\left. \frac{d\Delta F(n)}{dn} \right|_{n^*} = 0. \quad (8)$$

Since the activation energy is  $U \gg kT$ , then almost all the nuclei that have reached  $n=n^*$  will be realized in the centers of the new phase. Due to the same relation, each such nucleus can be considered as an attracting center, a spatial attractor for ions.

The considered classical model of nucleation, being an essential idealization, does not answer many questions of the structure formation theory. In particular, the probability of joining new structural units to existing ones depends on the nature of the interface and, in a discrete representation, on the structure of the nearest environment of the structural units under consideration. Such a quantity is not isotropic (it will differ in directions). Despite the simplification, the above representation indicates the main trends – the stochastic nature of the formation of nuclei of a new phase and the existence of its critical size.

One of the essential heuristic analogies, which is valid for disperse systems, is the "atom – colloidal particle" analogy. It allows transferring, with appropriate correction, approaches and methods of description between structural levels of different scales. In particular, at the next stage of growth, the formation of groups of particles – clusters and groups of clusters, and the formation of a hierarchical structure of the material [2] is observed. It is fundamentally different from the structure of crystalline bodies, the ordering here is of a probabilistic-statistical nature. The model of close packing and a constant coordination number of a cluster-forming particle seems to be rarely implemented due to the uneven distribution of the free energy of the particle surface. Clusters and their groups form a poorly ordered system, more characteristic of a liquid (short range order), hence the need for a statistical description. The approach presented in [1, 2] is generally valid for their formation. It is important to take into account that the emerging clusters, like the emerging nuclei for ions, are spatial "traps" that attract sets for colloidal particles.

The formation of a coagulation structure is associated with the interaction of colloidal particles. It is carried out due to a set of forces of various nature – dispersion, dipole-dipole, electrostatic (associated with the mutual influence of double layers) interaction due to the structural-mechanical barrier formed, in particular, by the surface layers of adsorbed particles. As a result, the representation in the form of a sum (9):

$$U(\mathbf{r}) = \sum_i U_i(\mathbf{r}) = U_{disp}(\mathbf{r}) + U_{electrost}(\mathbf{r}) + U_{str-mech}(\mathbf{r}) + \dots, \quad (9)$$

provides an adequate description of the complex nature of the interaction of colloidal particles.

One of the model approximations can be a refusal to consider specific types of contributions to potential energy or simplified assumptions about them. In the simplest case, it is possible to take into account the only qualitative feature and replace the considered potential (9) with a model one – a "comb" or a sum of sinusoids. The "comb" method turns out to be useful, in particular, in studying the spatial structure of [11] proteins. The dynamics of particle interaction during coagulation structure formation can then be considered by the Kramers or Langevin method [12].

Coagulation and crystallization clusters at the next stages form a percolation hierarchical structure, due to which the system undergoes setting and eventually forms a stone-like body due to the enclosing nature of the percolation cluster of interparticle contacts of various nature (coagulation and crystallization contacts, interparticle adhesion contacts). In addition, it should be noted the implementation of deep minima in effective potentials (9), due to the existence of the "material" connections discussed above. Thus, the interaction and mutual transition between discrete (spatial structures) and continuous (distribution of binder particles) is characteristic of all stages of structure formation.

*DP "randomness-necessity".* In any disperse system, there are interactions that can be fairly conventionally divided into deterministic and stochastic, and their further study can be carried out by various methods, including combined ones. In a number of cases, such a division is due to physical reasons, for example, a significant difference in the masses of the molecules of the solution and the Brownian particle. The probabilistic description is also justified in the case of unstable chaotic dynamic regimes. For the corresponding systems (of a deterministic nature!) it becomes possible to indicate equations similar to diffusion ones. Often the selection of the stochastic part is determined subjectively by the degree of difficulty of the study. Randomness should be recognized

as an unknown necessity, and necessity as a common mechanism for generating randomness.

All these mutual transitions can be observed on the example of structure formation in materials. One of the most productive ways of considering this DP is based on information theory.

The concept of information involves choosing one or more options out of many and remembering the choice made. The choice can be made as a result of the action of external forces (reception of information) or due to the unstable behavior of the system (the emergence of new information). The process of formation of structures can be considered as the dynamics of the information system. It should include interactions that provide any structure-forming particle with the possibility of transition between the regions of influence of  $N$  stable states with subsequent attraction to one of them. Then the maximum information (information capacity) that the system can prepare is (10):

$$I_{max} = \log_2 N. \quad (10)$$

On the other hand, there are particles in the system for which it is possible to determine the thermodynamic probability  $W$ , including the values of their coordinates and momenta. The definition of physical entropy in bits through  $W$  also corresponds to micro information  $I^{mic}$  (11) [13]:

$$I_{max}^{mic} = \tilde{S}_{max} = \log_2 W. \quad (11)$$

The Brillouin principle of equivalence of information and physical entropy (12) is fulfilled for micro information:

$$I^{mic} + \tilde{S} = I_{max}^{mic} = \tilde{S}_{max} = \log_2 W. \quad (12)$$

The number of stable states  $N$  is usually much less than  $W$ . For the reception of information (10), it is necessary to perform work, due to which the system will pass into one of the stable states. In this case, part of the energy will be lost in the process of dissipation, and the physical entropy  $\tilde{S}$  will increase by a value exceeding the amount of information received. It is fair to consider such an effect as the "price" of the observed macroscopic process of self-organization. Due to dissipative properties, there is a transition to stable states, the lifetime of which  $\tau$  is determined by the height of the potential barrier between them (13):

$$\tau = \frac{h}{kT} \exp \frac{U}{kT}. \quad (13)$$

Let us pay attention to the fact that in the process of structure formation, the nuclei of a new phase and growing clusters ensure the existence of spatially stable states, which can be estimated by the sum (14):

$$N(t) = \sum_{n^*}^{n^{max}} Z(n, t). \quad (14)$$

It should be noted that (14) refers to the supercritical nuclei of a new phase – growing microcrystals.

A rough estimate also gives (15):

$$N_{max} = \frac{N_{at}}{n^*}, \quad (15)$$

here  $N_{at}$  is the number of mobile atoms involved in the growth of the nucleus. Such an approximation is possible, since starting from  $n=n^*$  the process can be considered irreversible,  $U > kT$ .

Thus, the process of formation of the embryonic structure and the further stage of growth can be interpreted as a kind of reception of information, the transformation of a part of micro information (11, 12) into (macro) information (10). In this case, due to the dissipation of the interaction energy of particles and the growing structure, the physical entropy increases, and the centers of the new phase correspond to stable states. A similar conclusion applies to many phase transitions accompanied by crystallization. During the structure formation of cluster systems, colloidal particles interacting with the total potential (9) are considered as "atoms", and a growing cluster can also be recognized as a kind of spatial stable state.

In the process of structure formation for materials of various nature, the formation of new elements and structures is observed – pores, capillaries, cracks. Even more complex structures are formed in composite materials with the participation of filler particles. The approach considered above can be extended to complex structures, if we take into account the possibility of complicating the nature of the potentials in the corresponding systems and the emergence of multi-stability. The geometric shape and other parameters of the emerging structures correspond to their own minima of the potential – the epigenetic landscape of the emerging system. General characteristics of a complex picture of structure formation with the emergence of new elements and simplified representations associated with the theory of nucleation are the formation of macro information (associated with the type of the emerging structure and the corresponding minima of the potential function – attractors) and the increase in physical entropy due to this according to (12).

The transition of a part of micro information into macro information is also carried out in the processes of destruction of the material. The microscopic level here should be recognized as the structure of the phase boundary (inter-cluster interfaces, pores and technological cracks) or the corresponding network structure. The formation of fracture cracks as a result of the imposition of internal and external deformations leads to the implementation of a stable mutual arrangement of spatial units (crystallites, atoms and molecules at the molecular level), corresponding to the destroyed material of the sample or structure (11, 12).

For several scale levels, it is possible to observe patterns of interaction and mutual transformation that are characteristic of this DP.

**Conclusions.** There are other DPs that play the role of coordinate axes in the study of systems. Among them, we note the following: "statics-dynamics", "inertia variability". All of these have been implicitly affected by the consideration of the above DPs. Conclusions. Thus, the analysis allows us to assume that the principle of adequacy should be recognized as a criterion for choosing a model approach to studying the mechanisms of structure formation: for each of the considered system coordinates, the complexity of the object must correspond to the covered complexity of the study method, and the target setting is an additional limitation. The considered "axes" are of the greatest interest for us. It seems desirable to reduce the complexity in other directions for the experimental study of structure formation. In particular, the selection of the binder material can be carried out in such a way as to reduce the complexity and variety of purely chemical processes (hydration). Such materials are mono-mineral binders. One of the possible options for the model system for the direction under consideration is gypsum binders and, in particular, gypsum  $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$  directly, the other is polymeric materials, for example, epoxy resin. The processes of setting and hardening of such materials go through various stages of structure formation, which can be described by the proposed methods of systems theory.

## Reference

- [1] V.N.Vyrovoy, V.S.Dorofeyev, V.G.Sukhanov, *Kompozitsionnyye stroitel'nyye materialy i konstruksii*. Odessa: ODABA, 2011.
- [2] L.S. Potapova, V.P. Yartsev, *Mekhanika materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii. Kak prognoziryut predel'nyye napryazheniya?* M.: Mashinostroyeniye, 2005.
- [3] M. Peschel, *Modeling of complex signals and systems*. M.: Mir, 1991.
- [4] B.T. Taymasov, V.K. Klassen, *Khimicheskaya tekhnologiya vyazhushchikh materialov: uchebnik*. Shimkent-Belgorod: Izd-vo BGTU, 2017.
- [5] A.N. Gerega, "Genesis of the structure and power of everyday composite materials. Computer modeling", avtoref. dis. na zdotuttya nauk. stupenya d-ra tekhn. nauk: 05.23.05, Odes'ka derzhavna akademiya budivnictva ta arhitekturi. Odessa, 2011.
- [6] N.N. Kruglitsky, *Fundamentals of physical and chemical mechanics*, part 1. Kyiv: Vysshaya shkola, 1975.
- [7] *Polimernyye kompozitsionnyye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya: uch. posobiye* / M.L. Kerber, V.M. Vinogradov, G.S. Golovkin i dr. SPb: Professiya, 2008.
- [8] V.N. Vyrovoy, I.V. Dovgan', S.V. Semenova, *Osobennosti strukturoobrazovaniya i*

*formirovaniya svoystv polimernykh kompozitsionnykh materialov*: monografiya. Odessa: TES, 2004.

- [9] *Handbook of Crystal Growth*. Edited by D.T.J Hurle. Vol. 1. North-Holland, 1993–1995.  
 [10] E.M. Lifshits, L.P. Pitaevskii, *Fizicheskaya kinetika*. M.: Fizmatlit, 2007.  
 [11] A.B. Rubin, *Biofizika: v 3-kh tomakh*. Tom 1. *Teoreticheskaya biofizika*. M.: URSS, 2013.  
 [12] I.V. Dovgan', A.V. Kolesnikov, S.V. Semenova, "Metody opisaniya protsessov koagulyatsii i strukturoobrazovaniya v stroitel'nykh vyazhushchikh materialakh", *Vestnik OGASA*, no. 38, pp. 230-235, 2010.  
 [13] D.S. Chernavskiy, *Sinergetika i informatsiya. Dinamicheskaya teoriya khaosa*. M.: Nauka, 2001.

## БУДІВЕЛЬНІ КОМПЗИТИ ЯК ОБ'ЄКТИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

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

kolesnikovandrey2791@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8737-0933

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

semenovablacksea@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5309-5854

<sup>1</sup>**Вировой В.М.**, д.т.н., професор,

vyrovoy@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8818-4112

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

tanoley@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4469-6797

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

**Анотація.** Стаття присвячена розгляду завдань матеріалознавства з позиції загальної теорії систем. Використано метод діалектичних пар «частина-ціле», «безперервне-дискретне» та «випадковість-необхідність», що відповідають загальносистемним координатам, на основі яких виникає третя емерджентна складова синтетичного характеру. Теоретико-системні методи дозволяють конкретизувати модельні уявлення за допомогою елементів теорії кристалізації та динамічної теорії інформації. Системні уявлення застосовуються для уточнення поняття границі розділу у матеріалах і гетерогенних системах. Показано діалектичну єдність атомістичних та геометричних уявлень у теорії утворення нової фази у в'язучих матеріалах. Імовірнісний та інформаційний опис розглядається як реалізація діалектичної пари "випадковість-необхідність". Поняття інформації тісно пов'язане з вибором одного або кількох варіантів багатьох і запам'ятовування зробленого вибору. Вибір може здійснюватися внаслідок дії сторонніх сил (рецепція інформації) або через нестійку поведінку системи (виникнення нової інформації). Процес утворення структур можна розглядати як динаміку інформаційної системи. Вона повинна включати взаємодії, що забезпечують будь-якій структуроутворюючій частинці можливість переходу між областями впливу стійких станів з наступним тяжінням до одного з них. Формування структур у в'язучому матеріалі з позиції динамічної теорії інформації сприймається як рецепція інформації. Для рецепції інформації необхідно зробити роботу, за рахунок якої система перейде в один із стійких станів. Формування нових елементів і структур – пор, капілярів і тріщин розглядається як перехід системи до своїх власних мінімумів потенціалу – епігенетичного ландшафту матеріалу як системи, що формується. При цьому частина енергії загубиться у процесі дисипації, а фізична ентропія збільшиться на величину, що перевищує кількість отриманої інформації. Такий ефект справедливо розглядати як «ціну» макроскопічного процесу самоорганізації, що спостерігається. Залучення теорії систем допомагає також з урахуванням принципу адекватності вказати шлях вибору модельного об'єкта, оптимального для дослідження процесів структурних трансформацій матеріалу.

**Ключові слова:** композиційні будівельні матеріали, дисперсні системи, системний підхід, структуроутворення, діалектичні пари.

Стаття надійшла до редакції 13.02.2023

**ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПУЧУЮЧОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ  
ВОГНЕЗАХИСТУ ДЕРЕВ'ЯНИХ СПОРУД**

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

<sup>2</sup>Бондаренко О.П., к.т.н., доцент,  
bondolya3@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8164-6473

<sup>2,3</sup>Цапко О.Ю., к.т.н., с.н.с.,  
alekseysapko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2298-068X

<sup>1</sup>Горбачова О.Ю., к.т.н.,  
gorbachova.sasha@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7533-5628

<sup>1</sup>Мазурчук С.М., к.т.н.,  
mazurchuk.s.m@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6008-9591

<sup>2</sup>Жеребчук Д.С., студент,  
dianazerebcuk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7174-132X

<sup>1</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України  
вул. Героїв Оборони, 12в, м. Київ, 03041, Україна

<sup>2</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури  
пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03037, Україна

<sup>3</sup>Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс"  
вул. Казимира Малевича, 84, м. Київ, 03150, Україна

**Анотація.** Проведено аналіз вогнезахисних матеріалів для дерев'яних будівельних конструкцій і встановлено необхідність розробки надійних засобів захисту для гальмування процесу займання та розповсюдження полум'я по поверхні будівельної конструкції. Тому постає доцільність визначення бар'єру для теплопровідності захисного шару і встановлення механізму гальмування передачі тепла до матеріалу. За експериментальними даними встановлено, що необроблений зразок зайнявся на 52 с, полум'я поширилося по всьому зразку протягом 100 с, натомість зразок, вогнезахисний просочувальним розчином БС-13, зайнявся на 570 с, поширення полум'я поверхнею відбулося тільки на першій ділянці, максимальна температура димових газів становила 86 °С, а індекс горючості склав 3,42. Для зразка вогнезахисного покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД» загорання не відбулося, оскільки на поверхні утворився захисний шар пінококсу, індекс горючості становив 0. У результаті досліджень доведено, що процес гальмування температури полягає в розкладанні антипіренів під термічною дією і виділенням легких інертних продуктів, утворенням сажоподібних продуктів на поверхні природного горючого матеріалу і теплоізолюванням дерев'яної конструкції. Завдяки цьому стало можливим визначення умов вогнезахисту деревини, шляхом утворення бар'єру для теплопровідності при розкладанні лаку на пінококс. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що зразок деревини, вогнезахисної покриттям, витримав температурний вплив при дії теплового потоку протягом 600 с. Це дає основи твердити про перспективу цілеспрямованого контролювання процесів вогнезахисту деревини шляхом використання вогнезахисних засобів, спроможних утворювати на будівельній конструкції захисний шар, що гальмує піроліз деревини.

**Ключові слова:** захисні засоби, вогнестійкість, втрата маси, оброблення поверхні, швидкість вигорання деревини, ефективність захисту.

**Вступ.** Деревина, як будівельний матеріал, все частіше використовується у будівництві й архітектурі оскільки має значні позитивні експлуатаційні властивості. Однак, враховуючи високу горючість, є пожежонебезпечним матеріалом, що обмежує сферу її застосування, особливо у багатоповерховому дерев'яному будівництві. Збільшити ступінь безпечної

експлуатації об'єктів, де використовуються матеріали і вироби з деревини, можливо за допомогою її захисного оброблення від вогню. Суть захисту деревини полягає в наданні їй здатності протистояти дії полум'я, поширенню полум'я поверхнею, в протидії термоокислюванню деструкції та гальмуванню процесу займання.

Відомо, що деревина не здатна до полуменевого горіння сама по собі, а горять продукти її розкладу, які утворюються під дією температури. Введення в матеріал антипіренів збільшує кількість виникнення інертних летких продуктів, що флегматизують газофазні реакції полум'я, усувають тління карбонізованого залишку та зменшують інтенсивність втрати маси [1, 2]. Просочувальні вогнезахисні композиції не завжди забезпечують стійкість деревини до впливу високотемпературного розкладу, оскільки не витримують температурно вологісних коливань та втрачають захисні властивості. Застосування спучуючих покриттів дозволяє теплоізулювати матеріал за рахунок утворення термостійкого шару та зберегти несучу здатність конструкції при дії вогню певного періоду часу [3, 4].

Тому встановлення параметрів пригнічення горіння деревини при підвищеній температурі й впливу покриття на цей процес і направлене на забезпечення вогнестійкості та відповідно, визначає необхідність проведення таких досліджень.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Вогнезахист дерев'яних будівельних конструкцій полягає в створенні на поверхні теплоізулюючих екранів, що витримують безпосередню дію вогню і дозволяють деревині зберігати свої функції протягом заданого періоду часу.

В роботі [4] було виявлено, що проби кокосового волокна середньої щільності, оброблені вогнезахисними (FR) розчинами, є ефективними у протистоянні пожежам. Це дослідження показало найбільш сприятливе поєднання БР розчину для додання вогнестійкості кокосовим волокнам. Зразки хімічно обробляли розчинами FR різних комбінацій бури і борної кислоти. Оброблені зразки показали істотне поліпшення їх стійкості до горючості й часу проникнення полум'я, знижену швидкість горіння і більш високу стійкість до поширення полум'я. Було проведено регресійний аналіз для визначення співвідношення між ваговим процентним вмістом бору FR, присутнього в розчині, й характеристиками стійкості до полум'я оброблених волокнистих плит кокосового волокна, в яких передбачалося, що прогнози є точними в межах  $\pm 3\%$ . У висновку встановлено, що будь-яка різниця у ваговій частці бору FR у розчині впливає на стійкість до полум'я і розчин, який містив 35% бору, надав максимальну вогнестійкість зразків кокосового волокна.

В роботі [5] розглянуто вплив зв'язуючого з рослинної сировини на створення гнучких теплоізуляційних матеріалів, але як вирішується питання, що пов'язано з горючістю, не вказано.

В роботі [6] розглядається вплив різних температур термічної модифікації та антипіренів на вибрані характеристики горіння та хімічні компоненти деревини тика (*Tectona grandis* L. f.). Термічну модифікацію проводили при температурах 160 °C, 180 °C і 210 °C. Згодом термомодифікована деревина була оброблена натуральними (арабіногалактан) і синтетичними (фосфат амонію) антипіренами. Вплив термічної модифікації, а також антипірену було виявлено за такими характеристиками горіння, як втрата ваги, швидкість горіння, максимальна швидкість горіння, співвідношення максимальної швидкості горіння та часу досягнення максимальної швидкості горіння. Хімічні зміни, викликані впливом цих факторів, визначалися зміною вмісту целюлози, геміцелюлоз, голоцелюлози, лігніну та екстрактивних речовин. Зв'язок між характеристиками горіння та хімічними змінами в термічномодифікованій деревині аналізували за допомогою кореляції Спірмена. Результати показали, що термічна модифікація тикового дерева негативно вплинула на його властивості займання та горіння. Синтетичний антипірен мав найвищий ефект уповільнення у всіх випадках. Природний антипірен спричинив кращий ефект уповільнення термічномодифікованої деревини при температурі 180 і 210 °C. Але збільшувався відносний вміст лігніну, екстрактивних речовин і целюлози, а зменшувалася кількість холоцелюлози і особливо геміцелюлози.

Якість використання інтумесцентних покриттів на основі неорганічних та органічних речовин показана в роботі [7], де за рахунок дії антипіренів на основі полі фосфату амонію та газоутворювачів і каталізаторів можливо впливати на утворення теплоізолювального шару пінококсу. Однак, постає необхідність дослідження що саме створює бар'єр для теплопровідності та забезпечення ефективної дії покриття з утворенням шару коксу.

У роботі [8] повідомляється про новий вогнезахисний підхід із застосуванням синергетичних дій, що поєднують унікальні властивості відновленого оксиду графену (rGO) і гідратованого натрію метаборати (SMB). Розроблено одноетапну обробку целюлозних матеріалів композиційним розчином, який створює бар'єрний шар rGO/SMB на поверхні тирси, що забезпечує високоефективний вогнезахисний захист з різними способами дії. Ці характеристики розроблено з урахуванням синергії між властивостями гідратованих кристалів SMB, які працюють як хімічний радіатор для уповільнення термічної деградації целюлозних частинок і газонепроникних шарів rGO, що запобігає доступу кисню та вивільненню токсичних летючих речовин. Зовнішній шар rGO також створює термічний і фізичний бар'єр, переміщуючи вуглець між полум'ям і незгорілими частинками деревини. Вогнезахисні характеристики розробленого графен-боратного композиту та механізм їх режимів вогнезахисту продемонстровано шляхом тестування кількох різних форм целюлозних матеріалів з використанням соснової тирси, ДСП та структур на основі волокна. Результати показали їхню видатну самозатухаючу поведінку зі значною стійкістю до вивільнення токсичних і легкозаймистих летких речовин, що свідчить про те, що вони є прийнятною альтернативою для заміни звичайних токсичних галогенованих вогнезахисних матеріалів.

В роботі [9] сказано, що значне підвищення стійкості до атмосферних коливань, механічних характеристик захисного шару отримується внаслідок високотемпературних сполук при застосуванні тих чи інших добавок. Однак, для цього процесу необхідно навести відповідні речовини та фізико-хімічні розрахунки.

В роботі [10] показано, що значна кількість захисних покриттів має цілу низку недоліків, в тому числі таких, як нанесення окремих компонентів, їх експлуатація при зміні температурно-вологісних полів. При термічній дії вони втрачають свої функціональні властивості та не здатні захистити матеріали і вироби з деревини. Це означає, що не встановлено, як саме проходить процес розкладання вогнезахисного при експлуатації при підвищених температурах.

В роботі [11] наведено дослідження захисних матеріалів, створених із органічних речовин з розчином із колеманітової руди. Показано, що завдяки встановленим співвідношенням є допустимим зміна вмісту складових для обумовлення процесу теплостійкості.

В роботі [12] досліджено вплив натурального волокна (NF), поліфосфату амонію (APP), тригідрату оксиду алюмінію (ATH) та гібриду ATH/APP на горючість, термічні й механічні властивості композитів. Введення натурального волокна (NF) в чисту епоксидну матрицю зменшило загальну теплоту згоряння і забезпечило покращені властивості термічної деградації. Додавання APP підвищило вогнестійкі властивості композиту зі значно зменшеним загальним часом полум'я та нульовою крапелькою. Гібрид 10 мас.% тригідрату оксиду алюмінію (ATH) і 5 мас.% поліфосфату амонію (APP) продемонстрував найбільш багатообіцяючу вогнестійкість із властивістю самозагасання, а також найнижчу валову теплоту та найбільший залишок обуглення серед різних досліджених складів. Загалом склади, що містять лише ATH, не можуть забезпечити ефективний питомий опір полум'ю, порівняно з композиціями, наповненими APP. Композиції, наповнені ATH, знижували міцність на розрив, подовження при розриві та властивості при згині, тоді як спостерігалось збільшення міцності на згин композицій, навантажених APP.

В роботі [13] показано, що графеновий наноліст (GNS) в поєднанні з традиційним шаруватим подвійним гідроксидом (LDH), шаруватим гідроксидом рідкоземельних металів (LRH) і антипіреном на основі фосфору (DOPO) використано для підвищення вогнестійкості

епоксидної смоли. Синергічний ефект затримки полум'я досягається в системах GNS/LDH і GNS/DOPO, де комбіновані GNS і LDH підвищують в'язкість розплаву епоксиду та обмежують поширення полум'я через інгібування крапель. Граничний кисневий індекс епоксиду підвищувався з 15,9 до 23,6 при додаванні 0,5 мас. % кожного з GNS і LDH. З додаванням 2,5 мас. % GNS і LDH, загальне тепловиділення епоксидної смоли також зменшилося від 33,4 МДж/м<sup>2</sup> до 24,6 МДж/м<sup>2</sup>. Синергічний ефект GNS і DOPO отримав інший механізм. Додавання 2,5 мас. % GNS і DOPO зменшили пікову швидкість тепловиділення від 1194 кВт/м<sup>2</sup> до 396 кВт/м<sup>2</sup>, а загальну швидкість тепловиділення від 72,5 МДж/м<sup>2</sup> до 48,1 МДж/м<sup>2</sup>. Синергічні механізми вогнезахисних засобів були ретельно проаналізовані та співвіднесені з вогнезахисними властивостями.

Розробка екологічно чистого та високоефективного антипірену для застосування в тонкому полімерному покритті все ще залишається серйозною проблемою. В роботі [14] розроблено композиційний антипірен з графену для скляних листів за допомогою нового рідкофазного процесу ексфоціації на місці. Коли антипірен додається до полімерного покриття, він демонструє високу вогнестійкість для горючого пластику, дерева та негорючої сталі. Граничний кисневий індекс (приблизно 32,3%) і рейтинг UL-94 V-0 ультратонкого полімерного покриття (приблизно 65 мкм) можна отримати для вогнезахисту деревини. Також спостерігається тривалий час вогнезахисна дія (55,0 хв.), яка набагато довше, ніж у звичайного полімерного покриття (1,0 хв.) для вогнезахисту сталі. Ця робота пропонує нову стратегію створення економічно ефективних тонких вогнезахисних полімерних покриттів для різного промислового застосування.

В роботі [15] досліджено, як органічні консерванти для деревини, що використовуються для її захисту від грибків і комах-шкідників, впливають на вогнестійкість і горючі властивості деревних матеріалів, які зазвичай використовуються у вітчизняній деревообробній та будівельній промисловості. З точки зору втрати несучої здатності деревини має значення лише глибина обвуглювання, оскільки її зменшення буде визначатися зменшенням поперечного перерізу деревини. Було перевірено вплив консервантів для деревини, застосованих для непошкоджених зразків сосни звичайної та ялини звичайної, кондиціонованих у нормальних кліматичних умовах. Тестові зразки пройшли повторну обробку, після чого перевірено дію різних комбінацій консервантів. З наявних на вітчизняному ринку засобів захисту деревини на основі органічних розчинників і водних засобів було вибрано сім сумішей для обробки. Експерименти з замочуванням показали, що консервуюче просочення ялини звичайної суттєво відрізняється від сосни звичайної, що вплинуло на порівняння результатів тесту. Експериментально досліджено вміст вологи, втрата маси та розраховано глибину обвуглювання. Вплив різних матеріалів для обробки було встановлено при аналізі розміру поверхневих опіків. Зразки сосни звичайної зазнали значно більшого опіку поверхні, ніж зразки ялини звичайної, незалежно від типу використаного консерванта. Більша щільність тіла, вміст смоли (1...10%) і більша початкова вологість сосни звичайної спричинили її згинання, а отже, й краще горіння.

Таким чином, дослідження впливу компонентів, які входять до складу покриттів, на процес теплоізолювання є невирішеною складовою забезпечення вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій, що і передувало умовам проведення досліджень.

**Мета дослідження.** Даною метою роботи було дослідження вогнезахисної ефективності спучуючого покриття для деревини та встановлення механізму її вогнезахисту.

**Матеріали і методи досліджень.** Для встановлення горючості деревини, використовували зразки необроблені (рис. 1), а також оброблені захисними покриттями відповідно до технологічного регламенту на вогнезахисні речовини. А оскільки вони характеризуються відповідними реологічними властивостями і поглинанням, то оброблена деревина має різні значення витрати покриття. Так, оброблення деревини проводили просоченням сумішшю «БС-13» у кількості 560 г/м<sup>2</sup>, а також покриттям «ФАСРВОЛ-ВУД» у кількості 241,1 г/м<sup>2</sup>. В таблиці 1 наведено характеристики деревини після оброблення.



Рис. 1. Модельні зразки деревини для випробувань

Таблица 1 – Порівняльна характеристика маси зразків до і після обробки

Назва антипірену	Маса зразка, г		Набір маси зразка, $\Delta m$	Набір маси зразка, %
	до обробки	після обробки		
необроблений зразок	98,8	98,8	–	–
«БС-13»	99,6	103,8	4,2	4,9
«ФАЄРВОЛ-ВУД»	156	162,5	6,5	6,7

Такий вибір покриттів пов'язаний з тим, що до сьогодення існують різні типи вогнезахисних засобів для деревини. Так, зокрема, просочувальні антипірени для деревини («БС-13») характеризуються низькою вартістю, а механізм їхньої дії пов'язаний з розкладом антипіренів під термічною дією, що супроводжується поглинанням тепла і виділенням негорючих газів та утворенням важкогорючого зугленого залишку на поверхні деревини. Такі речовини захищають деревину протягом незначного періоду часу (~600 с). Але з'являються нові покриття, що являють собою суміш каталізаторів та вуглеводнів, утворювачів газу та в'язучих речовин, які здатні при термічній дії утворювати пінококсовий спучений шар, що і запобігає проникненню високої температури до деревини. До таких покриттів відноситься і «ФАЄРВОЛ-ВУД».

Дослідження з визначення термічної стійкості вогнезахисної деревини проводили за методикою, суть якої полягала у термічній дії на зразок вогнезахисної деревини радіаційної панелі, його запалювання, вимірюванні температури летких речовин горіння та часу її настигання, часу їх займання та проходження полум'я по ділянкам поверхні, вимірювання довжини згорівшої частини зразка [5]. І за отриманими випробуваннями розраховується безрозмірний індекс горючості за коефіцієнтом  $I$ :

$$I = \sqrt{\frac{q \cdot Q}{W} \cdot \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\text{но}}} \cdot \frac{\tau_{\max} - \tau_0}{\tau_0} \cdot \left[ 1 + \frac{60 \cdot I_r}{l} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i} \right]}, \quad (1)$$

де  $q$  – питома теплота згорання газу пропан (23630), кДж·л<sup>-1</sup>;

$Q$  – витрата газу запального пальника (0,001), л·с<sup>-1</sup>;

$W$  – потужність електричної радіаційної панелі, 0,5 кВт;

$\Delta T_{\max}$  – максимального приросту температури летких продуктів горіння:

$$\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_0,$$

де  $T_0$  – температура навколишнього середовища, °С;

$T_{\max}$  – максимальна температура летких продуктів горіння, °С;

$\Delta T_{\text{но}}$  – максимального приросту температури нагрівального обладнання:

$$\Delta T_{\text{но}} = T_1 - T_0,$$

де  $T_1$  – температура вихідного повітря при роботі нагрівального обладнання, °С;

$\tau_0$  – час займання зразка, с;

$\tau_{\max}$  – час досягнення максимальної температури димових газів, с;

$\tau_i$  – час проходження фронтом полум'я контрольних ділянок, с;

$l$  – довжина зразка, мм;

$l_r$  – довжина пошкодження зразка, мм.

На рис. 2 наведено пристрій для проведення досліджень по визначенню параметрів займання та поширення полум'я у вигляді випробувальної камери об'ємом  $0,125 \text{ м}^3$ .

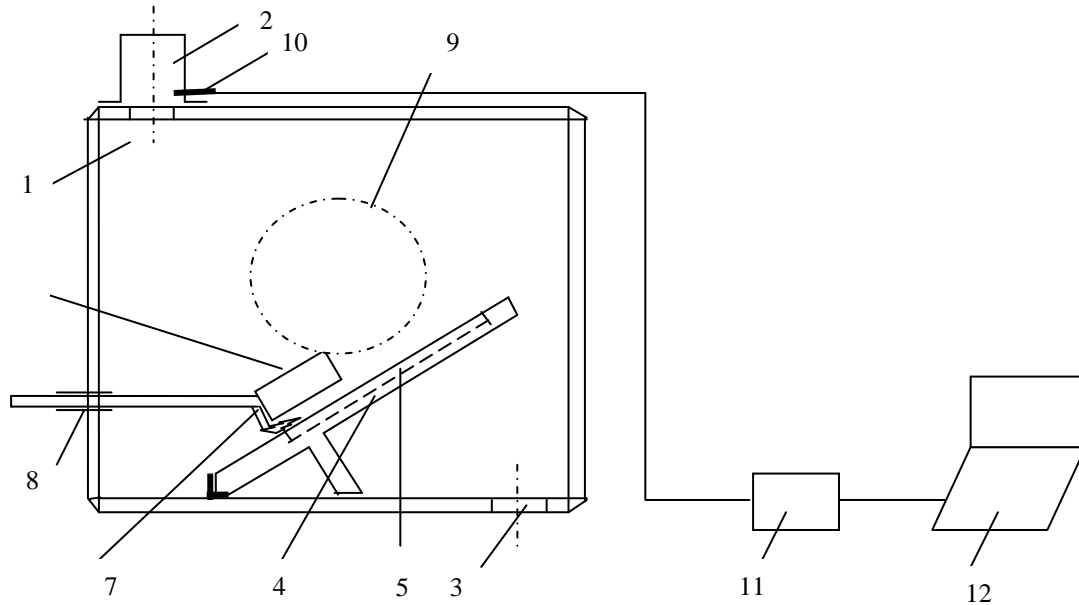


Рис. 2. Пристрій для визначення параметрів займання та поширення полум'я:

1 – випробувальна камера; 2 – витяжна труба; 3 – вентиляційний отвір; 4 – тримач зразка;

5 – зразок; 6 – радіаційна панель; 7 – запалювальний пристрій; 8 – регульовальна труба;

9 – оглядове скло; 10 – термопара; 11 – аналого-цифровий перетворювач; 12 – комп'ютер

Перед проведенням випробувань необхідно запалити палик 7 і відрегулювати висоту полум'я. Включити електричну радіаційну панель 6 та прилад для реєстрації температури і визначити початкову температуру димових газів термопарою 10. Підготовлений до випробувань зразок матеріалу 5 встановлюють в тримач 4, та підводять до радіаційної панелі 6. У процесі випробування визначають: час запалювання (час від початку випробування до початку проходження полум'ям нульової позначки), час проходження полум'ям  $i$ -ої ділянки по поверхні зразка, відстань, на яку поширилося полум'я, максимальну температуру летких продуктів горіння та час її досягнення.

Випробування триває до припинення горіння полум'я на поверхні зразка або при досягненні 600 с у разі відсутності займання зразка.

**Результати досліджень.** Для встановлення вогнестійкості деревини використовували запальний палик. На рис. 3 наведено процес проведення випробувань зразка необробленої деревини, на рис. 4 – зразка деревини, обробленого «БС-13», на рис. 5 – зразка деревини, обробленого покриттям «ФАСРВОЛ-ВУД».



а)



б)

Рис. 3. Процес проведення випробувань необробленої деревини:  
а – процес запалювання зразка; б – горіння зразка



а)



б)

Рис. 4. Процес проведення випробувань зразка деревини, обробленого засобом «БС-13»:  
а – запалювання зразка; б – результат випробувань

З вищенаведених експериментальних досліджень встановлено, що необроблений зразок загорівся, натомість для зразка захищеного від вогню – процес горіння та поширення полум'я пригнічується. Гальмування процесу займання та поширення полум'я для зразка вогнезахищеного «БС-13» полягає у поглинанні тепла, що пов'язане з розкладом антипіренів та виділенням негорючих газів, натомість для зразка, захищеного покриттям, відбувається утворення під термічною дією шару пінококсу, що ізолює від дії температури. Що свідчить про можливість переходу деревини при обробленні вогнезахисними засобами до матеріалів, які відносяться до важкозаймистих, що не поширюють полум'я поверхню.



а)



б)

Рис. 5. Процес проведення випробувань зразка деревини, обробленого покриттям «ФАСВОЛ-ВУД»: а – запалювання зразка; б – утворення теплоізолювального шару коксу

Результати визначення горючості наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Час проходження фронтом полум'я контрольних точок

Зразок деревини	Температура димових газів, °С		Час займання, с	Час проходження фронтом полум'я ділянок зразка, с									Час досягнення максимальної температури димових газів, с	Довжина горіння зразка, мм	Індекс горючості
	T <sub>1</sub>	T <sub>max</sub>		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
необроблений	61	323	52	2	8	7	10	6	8	7	6	7	101	294	177,5
вогнезахищений БС-13	60	86	570	396	8	9	–	–	–	–	–	–	586	62	3,42
вогнезахищений «ФАЄРВОЛ-ВУД»	58	84	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	600	–	0

Під час випробувань зразків деревини було встановлено, що необроблений зразок зайнявся на 52 с, полум'я поширилося по всьому зразку протягом 100 с, натомість, зразок, вогнезахищений просочувальним розчином «БС-13», зайнявся на 570 с, поширення полум'я поверхню відбулося тільки на першій ділянці, максимальна температура димових газів становила 86 °С за час більший у понад 5 разів, а індекс горючості склав 3,42 (табл. 4). Для зразка, вогнезахищеного покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД», загорання не відбулося, оскільки на поверхні утворився захисний шар пінококсу, індекс горючості становив 0.

З урахуванням того, що несучі будівельні конструкції можуть підпадати впливу температури пожежі протягом тривалого часу (понад 15 хв.), застосування просочення не раціональне, як наведено вище, оскільки не забезпечить стійкість вогнезахищеної деревини до полум'я. Тому для визначення межі поширення вогню для будівельних огорожувальних конструкцій, оброблених спучуючим покриттям, при довготривалій термічній дії, що характеризуються високотемпературним ефектом, були проведені натурні випробування [16]. У результаті досліджень встановлено, що необроблену деревину класифіковано як будівельний матеріал підвищеної горючості (Г4), а деревина, вогнезахищена спучуючим покриттям, відноситься до будівельних матеріалів низької горючості (Г1) та може використовуватись для забезпечення вогнестійкості несучих конструкцій. Стосовно довговічності приведених вище вогнезахисних засобів можна констатувати, що просочення має гарантований термін захисту деревини 3 роки, а покриття забезпечує захист протягом 8...10 років згідно регламенту.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Проведено експериментальні дослідження горючості деревини, захищеної просоченням та спучуючим покриттям при термічній дії високотемпературного полум'я. Визначено температуру на поверхні деревини, її займання та поширення полум'я поверхню, що дозволяє одержувати матеріал зі зниженим ступенем горючості. За експериментальними даними встановлено, що індекс горючості для деревини, вогнезахищеної просоченням засобом «БС-13», склав 3,42, а для деревини, обробленої покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД», індекс горючості становив 0, що показало ефективність захисту. Таким чином, проведені дослідження горючості деревини засвідчують, що механізм вогнезахисної ефективності направлений в сторону утворення на поверхні теплоізолюючого шару. Наявність теплоізолюючого шару пінококсу на зразку деревини змінює процес термічного розкладу, зменшує кількість летких продуктів горіння, які флегматизуються

великою кількістю інертних газів, що відповідно підтверджується результатами визначення індексу горючості. Найкращий результат отримано для зразка, вогнезахисного покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД», оскільки на поверхні утворився захисний шар пінококсу. Вочевидь такий механізм впливу покриття є фактором регулювання ступеня стійкості коксу та ефективності теплоізолювання матеріалу.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на встановлення взаємозв'язку між складовими та властивостями вогнезахисного просочувального розчину «БС-13» і вогнезахисного покриття «ФАЄРВОЛ-ВУД», а також їх оптимізацію.

### Література

1. Tsapko Yu., Tsapko A. Establishment of fire protective effectiveness of reed treated with an impregnating solution and coatings. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4. No 10 (94). P. 62-68. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141030>.
2. Tsapko Yu., Bondarenko O., Tsapko A. Effect of a flame-retardant coating on the burning parameters of wood samples. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. Vol. 2. No 10 (98). P. 49-54. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163591. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/163591/165012>.
3. Tsapko Yu., Tsapko A., Bondarenko O. Establishment of heat-exchange process regularities at inflammation of reed samples. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1. No 10 (97). P. 36-42. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156644. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/viewFile/156644/157209>.
4. Rejeesh C.R., Saju K.K. Relative improvements in flame resistance of coir fiberboards treated with fire-retardant solution. *Journal of Wood Science*. 2018. 64(5), C. 697-705. DOI: 10.1007/s10086-018-1747-3.
5. Xiao Na, Zheng Xue, Song Shuping, Pu Junwen. Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber. *BioResources*. 2014. Vol. 9. No 3. P. 4924-4933. URL: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/effects-of-complex-flame-retardant-on-the-thermal-decomposition-of-natural-fiber/>.
6. Gaff M., Kačík F., Gašparík M., Makovická Osvaldová L., Čekovská H. The effect of synthetic and natural fire-retardant on burning and chemical characteristic of thermally modified teak wood. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 200. P. 551-558. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20193303123>.
7. Ciripi B.K., Wang Y.C., Rogers B. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coating in fire. *Fire Safety Journal*. 2016. Vol. 81. P. 74-84. URL: [https://www.academia.edu/22046522/Assessment\\_of\\_the\\_thermal\\_conductivity\\_of\\_intumescent\\_coatings\\_in\\_fire](https://www.academia.edu/22046522/Assessment_of_the_thermal_conductivity_of_intumescent_coatings_in_fire).
8. Nine Md.J., Diana N.H. Tran, Thanh Tung Tran, Kabiri Shervin, Dusan Losic. Graphene-Borate as an Efficient Fire Retardant for Cellulosic Materials with Multiple and Synergetic Modes of Action. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017. Vol. 9 (11). P. 10160-10168. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28244736/>.
9. Carosio F., Alongi J. Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coating on Flexible PU Foams within Seconds. *Elettronico*. 2016. Vol. 10. P. 6315-6319. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26925855/>.
10. Nasir K. Md., Ramli Sulong N.H., Johan M.R., Afifi A.M. An investigation into waterborne intumescent coating with different fillers for steel application. *Pigment and Resin Technology*. 2018. Vol. 47. No 2. P. 142-153. URL: [https://www.researchgate.net/publication/323444216\\_An\\_investigation\\_into\\_waterborne\\_intumescent\\_coating\\_with\\_different\\_fillers\\_for\\_steel\\_application](https://www.researchgate.net/publication/323444216_An_investigation_into_waterborne_intumescent_coating_with_different_fillers_for_steel_application).

11. Erdoğan Y. Production of an insulation material from carpet and boron wastes. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*. 2016. No 152. P. 197-202. URL: <https://dergipark.org.tr/en/pub/bulletinofmre/article/279199>.
12. Khalili P., Tshai K.Y., Hui D., Kong I. Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy composite. *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 114. P. 101-110. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X21002517>.
13. Shan L., Zhengping F., Hong-Qiang Y., Hao W. Synergistic Flame Retardancy Effect of Graphene Nanosheets and Traditional Retardants on Epoxy Resin. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*. 2016. Vol. 89. P. 26-32. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.012>.
14. Kangtai Ou, Zheming Liu, Zixuan Liu, Qiang Fu, Yang Cao, Qichao Liu, Youyi Sun. Ultra-thin flame retardant polymer nanocomposite coating based on synergistic effect of graphene and glass sheets. *Materials Research Bulletin*. 2023. Vol. 164. 112247. P. 1-10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112247>.
15. Lubl6y 6., T6mea M6sz6ros D., Tak6cs L., Norbert H. Examination of the fire performance of wood materials treated with different precautions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. 33691648. P. 1-12. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12050-2>.
16. Tsapko Yu., Tsapko A., Bondarenko O., Sukhanevych M., Kobryn M. Research of the process of spread of fire on beams of wood of fire-protected intumescent coatings. IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering*. TRANSBUD-2019. Vol. 708. 012112. P. 1-6. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012112>.

### References

- [1] Yu. Tsapko, A. Tsapko, "Establishment of fire protective effectiveness of reed treated with an impregnating solution and coatings", *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, vol. 4, no. 10 (94), pp. 62-68, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141030>.
- [2] Yu. Tsapko, O. Bondarenko, A. Tsapko, "Effect of a flame-retardant coating on the burning parameters of wood samples", *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 10 (98), pp. 49-54, 2019. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163591. [Online]. Available: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/163591/165012>.
- [3] Yu. Tsapko, A. Tsapko, O. Bondarenko, "Establishment of heat-exchange process regularities at inflammation of reed samples", *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, vol. 1. no. 10 (97), pp. 36-42, 2019. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156644. [Online]. Available: <http://journals.uran.ua/eejet/article/viewFile/156644/157209>.
- [4] C.R. Rejeesh, K.K. Saju, "Relative improvements in flame resistance of coir fiberboards treated with fire-retardant solution", *Journal of Wood Science*, 64(5), pp. 697-705, 2018. DOI: 10.1007/s10086-018-1747-3.
- [5] Na Xiao, Xue Zheng, Shuping Song, Junwen Pu, "Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber", *BioResources*, vol. 9, no. 3, pp. 4924-4933, 2014. [Online]. Available: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/effects-of-complex-flame-retardant-on-the-thermal-decomposition-of-natural-fiber/>.
- [6] M. Gaff, F. Ka6ik, M. Ga6par6k, L. Makovick66 Osvaldov66, H. 6ekovsk66, "The effect of synthetic and natural fire-retardant on burning and chemical characteristic of thermally modified teak wood", *Construction and Building Materials*, vol. 200, pp. 551-558, 2019. [Online]. Available: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20193303123>.

- [7] B.K. Ciripi, Y.C. Wang, B. Rogers, "Assessment of the thermal conductivity of intumescent coating sin fire", *Fire Safety Journal*, vol. 81, pp. 74-84, 2016. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/22046522/Assessment\\_of\\_the\\_thermal\\_conductivity\\_of\\_intumescent\\_coatings\\_in\\_fire](https://www.academia.edu/22046522/Assessment_of_the_thermal_conductivity_of_intumescent_coatings_in_fire).
- [8] Md.J. Nine, Tran Diana N.H., Tung Tran Thanh, Shervin Kabiri, Losic Dusan, "Graphene-Borateasan Efficient Fire Retardant for Cellulosic Materials with Multiple and Synergetic Modes of Action", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9 (11), pp. 10160-10168, 2017. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28244736/>.
- [9] F. Carosio, J. Alongi, "Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coatings on Flexible PU Foams within Seconds", *Elettronico*, vol. 10, pp. 6315-6319, 2016. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26925855/>.
- [10] K. Md. Nasir, N.H. Ramli Sulong, M.R. Johan, A.M. Afifi, "An investigation into waterborne intumescent coating with different fillers for steel application", *Pigment and Resin Technology*, vol. 47, no. 2, pp.142-153, 2018. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/323444216\\_An\\_investigation\\_into\\_waterborne\\_intumescent\\_coating\\_with\\_different\\_fillers\\_for\\_steel\\_application](https://www.researchgate.net/publication/323444216_An_investigation_into_waterborne_intumescent_coating_with_different_fillers_for_steel_application).
- [11] Y. Erdoğan, "Production of an insulation material from carpet and boron wastes", *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, no 152, pp. 197-202, 2016. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/en/pub/bulletinofmre/article/279199>.
- [12] P. Khalili, K.Y Tshai., D. Hui, I. Kong, "Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy composite", *Composites Part B: Engineering*, vol. 114, pp. 101-110, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X21002517>.
- [13] L. Shan, F. Zhengping, Y. Hong-Qiang, W. Hao, "Synergistic Flame Retardancy Effect of Graphene Nanosheets and Traditional Retardants on Epoxy Resin", *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, vol. 89, pp. 26-32, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.012>.
- [14] Ou Kangtai, Liu Zheming, Liu Zixuan, Fu Qiang, Cao Yang, Liu Qichao, Sun Youyi, "Ultra-thin flame retardant polymer nanocomposite coating based on synergistic effect of graphene and glass sheets", *Materials Research Bulletin*, vol. 164, 112247, pp. 1-10, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112247>.
- [15] É. Lubl6y, D. T6mea M6sz6ros, L. Tak6cs, H. Norbert, "Examination of the fire performance of wood materials treated with different precautions", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 33691648, pp. 1-12, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12050-2>.
- [16] Yu. Tsapko, A. Tsapko, O. Bondarenko, M. Sukhanevych, M. Kobryn, "Research of the process of spread of fire on beams of wood of fire-protected intumescent coatings", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. TRANSBUD-2019*, vol. 708, 012112, pp. 1-6, 2019. [Online]. Available: <https://doi:10.1088/1757-899X/708/1/012112>.

**JUSTIFICATION OF THE EFFICIENCY OF FLOATING COATING FOR FIRE PROTECTION OF WOODEN BUILDINGS**

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

<sup>2</sup>**Bondarenko O.**, PhD, Associate Professor,  
bondolya3@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8164-6473

<sup>2,3</sup>**Tsapko A.**, PhD, Senior Research Fellow,  
alekseytsapko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2298-068X

<sup>1</sup>**Gorbachova A.Yu.**, PhD,  
gorbachova.sasha@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7533-5628

<sup>1</sup>**Mazurchuk S.N.**, PhD,  
mazurchuk.s.m@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6008-9591

<sup>2</sup>**Zherebchuk D.**, student  
dianazerebcuk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7174-132X

<sup>1</sup>*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*  
Heroiv Oborony str., 15, Kyiv, 03041, Ukraine

<sup>2</sup>*Kyiv National University of Construction and Architecture*  
Povitroflotsky ave., 31, Kyiv, 03037, Ukraine

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

**Abstract.** The analysis of fire-resistant materials for wooden building structures was carried out and the need for the development of reliable means of protection to inhibit the ignition process and the spread of flame on the surface of the building structure was established. Therefore, there is a need to determine the conditions for the formation of a barrier for thermal conductivity and to establish a mechanism for inhibiting the transfer of heat to the material. According to experimental data, it was established that the untreated sample ignited for 52 s, the flame spread throughout the sample within 100 s, on the other hand, the sample, fire-protected with the impregnation solution BS-13, ignited for 570 s, the flame spread over the surface only in the first section, the maximum temperature of flue gases was 86 °C, and the flammability index was 3.42. For the sample protected by the "FIREWALL-WOOD" coating, the fire did not occur, because a protective layer of pinocoke was formed on the surface, the flammability index was 0. As a result of research, it was proven that the process of temperature inhibition consists in the decomposition of flame retardants under the influence of temperature with the absorption of heat and the release of non-combustible gases. Formation of soot-like products on the surface of natural combustible material and thermal insulation of a wooden structure. Thanks to this, it became possible to determine the conditions of fire protection of wood, by forming a barrier for thermal conductivity during the decomposition of varnish into foam coke. Experimental studies have confirmed that a sample of wood covered with a fire-resistant coating has withstood temperature effects under the influence of heat flow for 600 seconds. This gives reason to assert the possibility of targeted regulation of wood fire protection processes through the use of fire retardant coatings capable of forming a protective layer on the surface of the material that inhibits the rate of wood burning.

**Keywords:** protective agents, fire resistance, mass loss, surface treatment, wood burning rate, protection efficiency.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2023

**THEORETICAL FOUNDATIONS OF FORECASTING  
THE RESOURCE OF HYDRAULIC STRUCTURES**

<sup>1</sup>**Onyshchenko A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1040-4530  
<sup>1</sup>**Lantoukh-Liaschenko A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
albert.lantoukh@gmail.com, ORCID 0000-0002-6642-2359  
<sup>2</sup>**Kovalchuk V.**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
kovalchuk.diit@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4350-1756  
<sup>1</sup>**Karnakov I.**, postgraduate student,  
ihor.karnakov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8751-9934  
<sup>1</sup>*National Transport University*  
Omelianovycha-Pavlenka str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010  
<sup>2</sup>*Lviv Polytechnic National University*  
Street Stepana Bandery, 12, Lviv, 79013

**Abstract.** It is established that in terms of the discrete Markov process, the problem is reduced to the search for unconditional probabilities of the system  $S$  at an arbitrary step  $k$  in state  $S_i$ , that is, obtaining a transition probabilities matrix. In this formulation, the model is used for assessing the technical condition of the element; assessing the level of safety of operation of structural elements; ranking elements according to the need for repairs, reconstruction or replacement; in strategic planning of repair or reconstruction costs in conditions of limited funding and forecasting the remaining resource of elements.

It is established that the theoretical basis of the study, which aims to predict the resource of hydraulic structures in operation, is the Markov theory of random processes. For a mathematical description of the process of element degradation, the most successful is the mathematical apparatus of the Markov random processes.

Determination of the failure intensity parameter is the dominant feature of the Markov phenomenological model of damage accumulation to hydraulic structures' elements. The only parameter of lifecycle management is the failure rate  $\lambda$ . In the model under consideration, the parameter  $\lambda$  is determined based on the initial conditions for an individual element obtained from the survey results.

Because the parameter  $\lambda$  is determined for an individual element and must be specified each time after the next survey, the accuracy of the model will increase. The proposed model is integral. It does not contain an explicit theoretical apparatus for a material-sensitive element, its static scheme, construction technology, environmental conditions, etc. On the other hand, all these factors and many other secondary ones are taken into account in the model at the moment the state of the element is determined using classification tables containing physical and mechanical signs of degradation.

In the theory of structures, the statistical approach to formulating the transition matrix is widespread and is based on historical data from the structure operation system. It is believed that the transition matrix based on the data of the operating system is a more realistic basis for predicting the processes of structures degradation. A large number of foreign studies are devoted to the practical application of the transition matrix based on statistical data, which consider the features of transition matrices related to the bridge operation system in different countries. In this formulation, each element of the transition probability matrix  $P$  is the probability that the system in the state will move to state  $j$  in one step (i.e., in one year). At the same time, it is considered that there are no operational interventions, so the sub-diagonal elements are zero. As before, the sum of elements of the same line is 1 and the element  $p_{jj} = 1$  because state  $j$  is absorbing.

For the implementation algorithm of the Markov chain model for forecasting the technical condition of hydraulic structures in general, the initial data are: statistical data of the distribution of structures by the state at the time of the forecast, the rating assessment of the structure is calculated by an expert according to the scale and the forecast time in years.

It is established that the degradation properties of structural designs are described by two parameters: the degradation criterion and the failure rate. Any factor of the stress-strain state can be taken as a degradation criterion: reliability, internal forces, or deformations. The degradation criterion can be an arbitrary rating assessment. In our case, the reliability of the element is taken as the degradation criterion, as the most general factor of the stress-strain state.

**Keywords:** hydraulic structures, structural degradation of structures, Markov model, service life.

**Introduction.** The classical a priori formulation of the life cycle of a hydraulic structure here receives a rigorous scientific justification regarding resource – the structures are associated with universal models of describing the phenomenological degradation processes of hydraulic structures' elements by random functions of the Markov type. The central scientific idea of this approach is *a new paradigm of the theory of structures is to establish the relationship between the equations of boundary States and the variable of operating time.*

The problem of estimating and forecasting the resource, as a category of durability, is relevant not only for the latest hydrotechnical structures but also has an independent extraordinary weight as a factor of the state strategy for managing and preventing man-made risks. All countries face this problem, but the problem is becoming particularly significant due to several unfavourable reasons for Ukraine today. Among them, there is the complicated economic and financial situation in the country that provokes an increase in the rate of elements' degradation due to a chronic decrease in funding for maintaining the technical condition of hydraulic structures.

We should admit that the number of physically outdated structures is rapidly growing in the infrastructure now. Under these conditions, for trouble-free operation and extension of the service life of structures, new scientific approaches are needed to assess and predict the technical state of the hydraulic structures' elements at all stages of the life cycle and establish scientifically based service life. Such algorithms that provide quantitative criteria for the level of reliability in the time function and, accordingly, the ability to predict the resource of hydraulic structures' elements are considered in this paper.

**The problem and its relevance.** For a long time, the problem of the durability of hydraulic structures was the subject of attention exclusively to academic circles. Forecasting the resource of the hydraulic structures' elements while designing and operating was not paid due attention in the theory of structures. The longevity control device has always been primitive and the least studied. Indeed, there are no levers to control durability in the design apparatus of hydraulic structures. Their life cycle term is assigned directly, the calculated dependencies do not have variable time, and the durability problem is entirely in the designer's experience and intuition. On the other hand, the problem of resource assessment was and is the most significant in socio-economic terms. It is obvious that under these conditions, the models are aimed at evaluating and predicting the durability of hydraulic structures with practical implementation and meet the interests of society and state policy in man-made and economic security.

**Analysis of recent research and publications.** In scientific works [1–20], applied research aimed at the theoretical foundation's development to estimate and forecast the life cycle of construction structures and the practical apparatus to manage their resources is widely used.

In the most general form, the modern formulation of the durability problem is given in the documents of the Joint Committee on Structural Safety in the work "The typical model" ("Probabilistic Model Code, 1996") [15-17] and in the monograph by Robert E. Melchers [21], as the probability of reaching the limit state per time. To do this, enter a time-dependent limit state function:

$$g(\mathbf{X}, t) = R(\mathbf{X}, t) - Q(\mathbf{X}, t), \quad (1)$$

where  $R(\mathbf{X}, t)$  – generalized element resistance;  $Q(\mathbf{X}, t)$  – generalized loading effect;  $\mathbf{X}$  – vector of basic variables;  $t$  – time variable.

The reliability function itself, how is the probability of reaching the limit state over time  $t$  it has the form:

$$P(t) = \text{Prob}[\min g(\mathbf{X}(\tau); \tau) < 0 \text{ for } 0 < \tau < t] \quad (2)$$

or in terms of the limit state function:

$$P(t) = \text{Prob}[R(\mathbf{X}, t) - Q(\mathbf{X}, t) < 0]. \quad (3)$$

Thus, by dependencies (2) and (3), durability is formulated as a concept functionally related to reliability. Maximum value  $t$ , which satisfies equation (1-3) is the resource of the element.

The theoretical basis of the study, which aims to predict the resource of construction structures' elements in operation, is Markov's theory of random processes. Markov's theory is a process whose evolution only depends on a fixed current state over time. As it turned out in the last 15-20 years, the mathematical apparatus of random Markov processes is the most successful for the mathematical description of construction *structures' elements' degradation process*.

The degradation of elements in operation will be considered a flow of failures. In our case, the flow is considered a hierarchy of failures, which is physically a manifestation of the degradation of elements under the influence of loads and the environment. The stationary simplest Poisson-type flow is considered [1, 2].

**The research objective** is the theoretical foundations to predict the resource of hydraulic structures.

**Materials and methods of the research.** A mathematical model of a random process with continuous time and discrete states, the graph of which is linear, is called the Markov chain [1, 3, 4]. The Markov chain is described using *probabilities of states*. Let's denote the probability of states  $k$  of a chain pitch in this way:

$$p_i(k) = P(S_i^{(k)}); \quad p_{i+1}^{(k)} = P(S_{i+1}^{(k)}), \quad (4)$$

where  $k$  – a step number,  $k = 1, 2, \dots, n-1$ ;  $n$  – a status number,  $n = 1, 2, \dots$

For an arbitrary step of the Markov chain, there are certain probabilities of transition from one discrete state to another. *The probability of transition or the transition probability* at step  $k$  from the state  $S_i$  in the state  $S_j$  is called the conditional probability that the system  $S$  after step  $k$  will be in  $S_j$  provided that immediately before that it was in state  $S_i$ .

Let's denote  $p_{ij}$  as the probability of switching from state  $i$  to state  $j$  in one step. In this case, we will assume that time  $t_i < t_j$ . It is convenient to record the probabilities of transition from state  $i$  into state  $j$  in the form of a square matrix. So, for example, when  $n = 5$  ( $n$  – the number of states) we will have:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1 & 1-p_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 1-p_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & 1-p_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_4 & 1-p_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Matrix  $\mathbf{P}$  is called a *homogeneous transition matrix* (transient probabilities). The sum of the transition probabilities of an arbitrary string is equal to one:

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1. \quad (6)$$

A vector of initial probabilities is added to the transition matrix, which sets the distribution of absolute probabilities at the beginning of the process:

$$\mathbf{p}_0 = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T. \quad (7)$$

The Markov chain is fully characterized by matrix  $\mathbf{P}$  with the initial probability vector  $\mathbf{p}_0$ .

By the known transition matrix  $\mathbf{P}$  and the vector of initial probabilities  $\mathbf{p}_0$ , the absolute *probabilities* of the system's states after the fixed number of transition steps can be defined. So denoting  $p_i^{(n)}$  – the absolute probabilities of the system's states after  $n$  the expression of the absolute probability of the system in one step is:

$$p_i^{(1)} = p_1^{(0)} p_{1j} + p_2^{(0)} p_{2j} + \dots + p_n^{(0)} p_{nj} = \sum_i p_i^{(0)} p_{ij}, \quad (8)$$

where  $p_i^{(1)}$  – the absolute probability of the system moving from state to state in one step;  $p_i^{(0)}$  – initial probability, a component of the vector  $\mathbf{R}_0$ ;  $p_{ij}$  – transient probabilities of the system.

Similarly to (8), by induction, we can show that:

$$p_j^{(n)} = \sum_i p_i^{(0)} p_{ij}^{(n)} \quad (9)$$

where  $p_{ij}^{(n)}$  –  $n$ -step transition probability, determined by recurrent formula [1, 4]:

$$p_i^{(k)} = \sum_{j=1}^n p_j^{(k-1)} p_{ji} \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

where  $p_{ij}$  – transition probabilities, matrix elements  $\mathbf{P}$ ;  $k$  – step number;  $n$  – the number of states. Formula (10) is convenient to use when at the beginning of the process only one first of the component of the vector  $\mathbf{p}_0$  is known, that is, the initial probability in the first state.

Next, the task is: to find the probabilities of events of the Markov chain  $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$ , as functions of time. We emphasize that we are now considering a *homogeneous* Markov chain, i.e. one whose transition probabilities are not a function of the step number.

Let's consider a failure chain from  $n$  events. How each of the failures is characterized is irrelevant now. Firstly, the chain must  $n$  possible states:  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , and secondly, the states are connected with a linear graph of the chain, and transitions occur only in one direction – from state  $i$  to state  $i + 1$ .

The probability of making a step  $k$  on which the system will switch from state  $S_i$  into state  $S_{i+1}$  is characterized by a transition probability density:  $\lambda_{i,i+1}$ . Find the function  $p_1(t)$  – the probability that the element at a given time  $t + \Delta t$  is in state of  $S_1$ . To do this, we will give  $t$  small increment  $\Delta t$ . It is necessary that within the time  $\Delta t$  the element did not leave a state  $S_1$ . The probability of this is found as the product of the probability  $p_1(t)$  by the *conditional probability* that in time  $\Delta t$  the element will enter state  $S_2$ . This probability is  $1 - \lambda_{12}\Delta t$ . Applying the probability addition rule, we get:

$$p_1(t + \Delta t) = p_1(t)(1 - \lambda_{12}\Delta t). \quad (11)$$

Expand the parentheses in this expression, transfer  $p_1(t)$  to the left side and divide both parts of the equation by  $\Delta t$ , we get:

$$\frac{p_1(t + \Delta t) - p_1(t)}{\Delta t} = -\lambda_{12}p_1(t). \quad (12)$$

Next, we will direct  $\Delta t$  to zero and go to limit:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_1(t + \Delta t) - p_1(t)}{\Delta t} = -\lambda_{12}p_1(t). \quad (13)$$

The left side of this expression is the derivative of function  $p_1(t)$ :

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = -\lambda_{12}p_1(t) \quad (14)$$

Thus, a differential equation is obtained, which must satisfy function  $p_1(t)$ .

The differential equation for determining the function  $p_2(t)$  is obtained in the same way, with the difference that at the moment of time  $t + \Delta t$  we have for state  $S_2$  two situations:

– at the moment  $t$  the element was able to  $S_1$ , and for time  $\Delta t$  moved to state  $S_2$ ;

– or at the moment  $t$  the item was already in  $S_2$  and over time  $\Delta t$  not moved to state  $S_3$ . Given that, the differential equation for  $p_2(t)$  is recorded as:

$$\frac{dp_2(t)}{dt} = -\lambda_{23}p_2(t) + \lambda_{12}p_1(t). \quad (15)$$

Further, the entire system of differential equations is compiled according to one sample:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = -\lambda_{i,i+1} p_i(t) + \lambda_{i-1,i} p_{i-1}(t), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

In general, the equations of probability states (16) are written as follows:

$$\frac{dp_{ij}(t)}{dt} = \sum_k \lambda_{ik} p_{kj}(t); \quad i, j, k = 1, 2, \dots, n. \quad (17)$$

These are the known Kolmogorov-Chapman equations describing the evolution of a discrete Markov process with continuous time [3-5]. In matrix form, equations (20) are:

$$\frac{d\mathbf{P}(i, t)}{dt} = \mathbf{P}(i, t) \cdot \mathbf{E}, \quad (18)$$

where  $\mathbf{E}$  – state flow intensity vector.

By integrating the system of equations (18), the desired probabilities of states – the time function are obtained. The initial conditions for integration are as follows:

$$\text{at } t = 0 \quad p_1(t)=1; \quad p_2(t) = p_3(t), \dots, = p_n(t) = 0. \quad (19)$$

In addition, the normalization condition is used in solving a system of differential equations:

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1, \quad (20)$$

which is a consequence of the fact that the events of Markov chains are incompatible and form a complete group. The solution of equations (20) is a matrix of the transition probabilities in the form of time-dependent variables.

By the known transition matrix elements  $\mathbf{P}$ , and the initial probabilities vector  $\mathbf{p}_0$  are defined by absolute probabilities system states in the time function after the fixed number of transition steps:

$$p_k(t) = \sum_{k=l-1}^n p_{k-1} p_{ik}(t), \quad (21)$$

where  $l$  – current status number;  $n$  – the number of discrete states in the element's lifecycle;  $p_k$  – absolute probability of the element in  $k$  – the discrete state;  $p_{ik}(t)$  – transient probability  $k$  – of the discrete state.

**Model of the Markov chain based on statistical data of the history of construction structures in operation.** Let's consider a family of random variables  $\{S_{ik}\}$ , forming a stochastic process at the time  $t_k$ , the system can be located, and form a complete group of events. The number of system states is finite.

**Hypotheses A.** A system is defined by a set of finite states and can only be in one of them at the moment.

**B.** The initial state of the system and the probability distribution of the initial state are known.

**B.** The stochastic process here is represented by an integral distribution function  $P(t)$  for the time  $T_n$ , which proceeds until all  $n$  process events happen – Poisson distribution:

$$P(t) = 1 - P(T_n > t) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}, \quad (22)$$

where  $\lambda$  is the process parameter failure rate (degradation rate);  $P_t$  – the probability that the element will enter the state  $k$  during the time  $t < T_k$ .

**Г.** The process object is a building. It follows from formula (22) that the states of the system at any moment  $t$  are set by their numbers  $k=1, 2, \dots, n$ . The transition from state  $S_j$  into state  $S_n$  exactly at  $k$  steps can occur in different ways. We consider a special case of the Markov chain in which movement through the states occurs only in one direction, sequentially from state  $j$  to state  $j + 1$ :

$$j < j_1 < j_2 \dots < j_{n-1} < j_n. \quad (23)$$

In other terms, we consider the process graph in which the transition only to the neighbouring state is allowed, that is, "jumps" are excluded.

To formulate the model, let's use the time-dependent transition matrix  $\mathbf{P}$ . Each element of this matrix  $p_{ij}$  is a probability that the system will change from state  $i$  to state  $j$  during a certain period. Then if the initial state  $\mathbf{p}_0$  is known, then the future state of the system can be predicted for any arbitrary time  $t$ .

Future state vector  $\mathbf{p}_t$  can be obtained by multiplying the initial state of vector  $\mathbf{p}_0$  to transition matrix  $\mathbf{P}$  in degree  $t$  (the number of years) [3, 4]. The initial state of the system is set by the tape-matrix  $\mathbf{p}_0$  in size  $[1 \times n]$ :

$$\mathbf{p}_0 = [p_1, p_2, \dots, p_n], \quad (24)$$

where  $p_i$  – probability of being in state  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  – the number of discrete states. The system state vector for time  $t$  is defined as the product of transition matrix  $\mathbf{P}$  on the initial state vector of the system:

$$\mathbf{p}_t = \mathbf{R}_0 \times \mathbf{P}^t, \quad (25)$$

where  $\mathbf{P}^t$  – transition matrix  $\mathbf{P}$  in degree  $t$ ;  $\mathbf{R}_0$  – probabilities vector in the initial state.

Next, a certain states vector is introduced  $\mathbf{d}$  in size  $[n \times 1]$  – vector of the fixed rating expert assessments of the structure in safe operation:

$$\mathbf{d} = [r_1, r_2, \dots, r_n]^T, \quad (26)$$

Here T – the transpose sign;  $r_{\text{and}}$  – ratings, real numbers,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

The technical condition of the structure for any time  $t$  is defined by the dependency:

$$D_t = \mathbf{p}_0 \times \mathbf{P}^t \times \mathbf{d}, \quad (27)$$

where  $D_t$  – rating assessment of the structure at time  $t$  – scalar;  $\mathbf{p}_0$  – matrix-tape in size  $[1 \times n]$  probabilities in the initial state  $t_0$ ;  $\mathbf{P}^t$  – transition probability matrix  $\mathbf{P}$  in degree  $t$  in size  $[n \times n]$ .

**Presentation of the main research material.** Here is a hypothetical illustrative example that demonstrates the procedure for implementing the Markov model to predict the structure state based on the known transition probability matrix. For the construction: the number of fixed discrete states is 5; the initial state vector (the safe operation rating vector):

$$\mathbf{d} = [10 \ 8 \ 6 \ 4 \ 2]^T,$$

– Matrix-tape in size  $[1 \times n]$   $\mathbf{R}_0$  probabilities in the initial state at  $t_0$ :

$$\mathbf{p}_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]:$$

– transition probability matrix:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0,939 & 0,061 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,679 & 0,330 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,549 & 0,451 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,449 & 0,551 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Find the construction rating forecast after  $t = 5$  years in operation.

The solution is the technical condition of the structure expressed in a rating assessment on a scale of 10 – 2 points after 5 years in operation for any time  $t$  is defined by the dependency:

$$D_t = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \times \begin{bmatrix} 0,730 & 0,137 & 0,079 & 0,039 & 0,018 \\ 0 & 0,144 & 0,240 & 0,266 & 0,374 \\ 0 & 0 & 0,050 & 0,143 & 0,808 \\ 0 & 0 & 0 & 0,018 & 0,982 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 10 \\ 8 \\ 6 \\ 4 \\ 2 \end{bmatrix} = 9,066$$

**Formulation of the transition matrix based on statistical data.** In the theory of structures, the statistical approach of formulating the transition matrix, which is based on historical data of the operating system, is now widespread. Most of them are based on the dependencies of the probability theory obtained by J. R. R. Tolkien, Bogdanoffim and F. Kozin [12-14], where the distribution of discrete states for each year  $\mathbf{W}(t)$  is obtained by multiplying the distribution of the previous state by transition matrix  $\mathbf{P}_0$ :

$$\mathbf{W}(t) = \mathbf{W}(t-1) \times \mathbf{P}_0, \quad (29)$$

where  $\mathbf{W}(t-1)$  – a vector of the previous state distribution.

Let's use the simplest of them – estimating the relative number of bridges in each of the states. The elements of the transition probability matrix are determined by formula:

$$p_{ij} = n_{ij} / n_i; \tag{30}$$

where  $n_{ij}$  – the number of clicks from state  $i$  into state  $j$  within a given time period;  $n_i$  – the total number of bridges in the state at the beginning of the specified time period.

Let's show the procedure to obtain a transition probabilities matrix using the example of statistical data obtained from the road bridge operation system. Let's look at the historical data of reinforced concrete bridges of all types in operation. The state distribution of all types of bridges is shown in Table 1 below.

Table 1– Distribution of road bridges by operational condition

State	1	2	3	4	5	Total
In absolute terms, units.	112	758	4288	1751	122	7031
In percentage, %	1.6	10.8	61.0	24.9	1.7	100

From Table 1 we obtain a super diagonal elements' vector of the transition probability matrix

**P**:  $p_{ij}, i = 1, 2, 3, \dots, 4; j = i + 1$ .

$$\mathbf{p}_{ij} = [0.016 \ 0.108 \ 0.610 \ 0.249]^T. \tag{31}$$

The corresponding transition probability matrix will have value:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0,984 & 0,016 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,892 & 0,108 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,390 & 0,610 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,751 & 0,249 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{32}$$

The transition probability matrix of one year in operation is calculated as  $\mathbf{P}^2$ :

$$\mathbf{P}^2 = \begin{bmatrix} 0,968 & 0,030 & 0,002 & 0 & 0 \\ 0 & 0,796 & 0,138 & 0,066 & 0 \\ 0 & 0 & 0,152 & 0,696 & 0,152 \\ 0 & 0 & 0 & 0,564 & 0,436 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{32a}$$

The transient probabilities matrix predicted after 5 years in operation will have value:

$$\mathbf{P}^5 = \begin{bmatrix} 0,923 & 0,062 & 0,008 & 0,006 & 0,001 \\ 0 & 0,565 & 0,120 & 0,220 & 0,096 \\ 0 & 0 & 0,009 & 0,388 & 0,603 \\ 0 & 0 & 0 & 0,239 & 0,761 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{32b}$$

Let's introduce a 100-point rating system. (An important note: the technical condition criterion in this model is a rating assessment of the technical condition of the structure), Table 2.

Table 2 – Rating assessment of the structure in operation

State in operation	Evaluation scale, points
State 1. Workable	100 - 79
State 2. Limited workable	80 - 59
State 3. Workable	60 - 39
State 4. Limited workable	40 - 19
State 5. Unworkable	≤ 20

**Algorithm forecasting the technical condition of structures.** The algorithm for implementing the Markov chain model for predicting the technical condition of the structure as a whole is given in Table 3.

Table 3 – Algorithm for predicting the technical condition of hydraulic structures

Step	Operation
1	Calculating super diagonal elements of the transition probability matrix with using formula (4.30): $p_{ij} = n_{ij} / n_i$ where $n_{ij}$ – the number of clicks from state $i$ into state $j$ within a given time period; $n_i$ – the total quantity of bridges in the state <i>and</i> at the beginning of the specified time period. Diagonal elements are calculated as an addition to 1.
2	The initial state of the system is set by the tape-matrix $\mathbf{p}_0$ by form (27).
3	The system state vector is calculated for time $t$ as a product of the transition matrix $\mathbf{P}$ in degree $t$ on the initial state vector of the system by formula (26) $\mathbf{p}_t = \mathbf{p}_0 \times \mathbf{P}^t$ .
4	A defined states vector is introduced $\mathbf{d}$ in size $[n \times 1]$ (a safe operation rating vector) by formula (27) $\mathbf{d} = [r_1, r_2, \dots, r_n]^T$ .
5	Technical condition of the structure for any time $t$ is defined by dependency (28) $D_t = \mathbf{p}_0 \times \mathbf{P}^t \times \mathbf{d}$ , where $D_t$ – rating assessment of the structure for time $t$ – scalar; $\mathbf{p}_0$ – matrix-tape in size $[1 \times n]$ probabilities in the initial state $t_0$ ; $\mathbf{P}^t$ – transition probabilities matrix $\mathbf{P}$ in degree $t$ in size $[n \times n]$ .

**The Markov phenomenological model of damage accumulation.** The Markov models of random processes described above are universal. The random process described by the model is invariant to the type of modeling object, to the material, and to the operating conditions. As for the failure intensity parameter, it is the subject of a special study in the phenomenological model of damage accumulation, its definition in our model is given below.

The task is to develop a phenomenological probabilistic model of the degradation of a structural element in operation. The element degradation model aims to establish the law of reliability in the time function and, thereby, give an apparatus for predicting its technical condition. The model developed by us has two components: the phenomenological classification tables of discrete states and the reliability function. The following four hypothetical propositions form the theoretical basis of the model.

**A.** The numerical reliability parameter is taken as a criterion for the technical condition of an element.

**B.** The element's life cycle is divided into 5 discrete states. Each of the states is described by a selection of quantitative and non-formalized qualitative degradation indicators that characterize the hierarchy of the element failures.

**C.** The process of element degradation during the life cycle is described by a discrete model of a random Markov process with continuous time.

**D.** The transition from one discrete state to another is described as a Poisson process with discrete states and continuous time by formula (25).

**Discrete states of the element.** The system evolution will be described by *the Markov discrete process with continuous time* [5, 6]. Let's formulate the Markov process for models in which wandering through discrete states is carried out only in one direction: from the state with a smaller number to the state with a larger number. At the same time, the transition is possible not only to the neighbouring state but also by "jumping" through neighboring states. In terms of the discrete Markov process, the problem is reduced to the search for unconditional probabilities of finding a system  $\mathbf{S}$  at an arbitrary step  $k$  in state  $S_i$ .

The system of failures, which is a consequence of the wear and tear of the structure element, will be considered a stream of random discrete Markov chain events. The process with "qualitative states" is considered. The role of a random variable is played by the "random discrete state of the system".

During the life cycle of an element in operation let's introduce 5 discrete states that form a tuple  $\mathbf{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_5\}$ . Discrete states are described by a selection of qualitative and quantitative indicators of no formalized degradation indicators that characterize the hierarchy of element failures

[7, 13]. A generalized description of states that represent damage accumulation as a hierarchy of gradual element failures is given in Table 4.

Table 4 – General characteristics of states

State	State characteristics
$S_1$	The element meets all the project requirements.
$S_2$	The element partially does not meet the requirements of the project, but the requirements of either the first or second groups of limit states are not violated.
$S_3$	The element partially does not meet the project requirements, but the requirements of the first group of limit states are not violated. A partial violation of the requirements of the second group of limit states is possible, if this does not limit the normal functioning of the structure.
$S_4$	The element has signs of violations of the requirements of the first group of limit states and serious violations of the requirements of the second group of limit states.
$S_5$	The element has serious violations of the requirements of the first group of limit states and it turns out that it is impossible to prevent them and stop its operation.

**Phenomenological description of the process of element degradation of a hydraulic structure.** The process of element degradation during the life cycle is described by discrete state classification tables. These tables, depending on the type of material and the design purpose of the element, are compiled on the basis of the experience of expert scientists [5, 7] on supervision, diagnostics, inspection and the testing of structures. In Table 5 an example of describing discrete states of construction structure elements is given.

Table 5 – Operational conditions of pre-stressed reinforced concrete elements

State	Defect or violation	Wear level, %
1	Single chipping of small rebar sizes in concrete Single sinks in the concrete of small sizes without exposing the reinforcement Single hair cracks without rust marks with opening up to 0.2 mm Hydrogen index $ph=11$	0-1
2	Local temperature-shrinkage cracks with opening up to 0.1-0.2 mm Local chipping of concrete without exposing rebar Local sinks without exposing fittings Local smudges without exposing the reinforcement Hydrogen index $ph=10$	2-4
3	Numerical chips in the stretched area of the structure Numerous sinks in stretched concrete Traces of leaching on the element surface Hydrogen index $ph=9$ Single opening of force cracks in inclined sections or along the reinforcement	5-14
4	Cracks in the stretched concrete with an opening of more than 0.2 mm Inclined force cracks in support zones Temperature cracks in support zones Traces of concrete leaching on the element surface Hydrogen index $ph=8$	15-33
5	Longitudinal cracks in compressed concrete along pre-stressed reinforcement with peeling of the concrete protective layer Traces of rust near cracks Uneven deflection of bent elements Hydrogen index $ph=7$	$\geq 34$

**Reliability function.** The reliability function describes the process of element degradation during the life cycle, that is, it establishes a relationship between reliability and the service life of the element. It is postulated that degradation speed is described by one parameter  $\lambda$  – an indicator of the failure rate. This indicator is assumed constant, independent of time  $\lambda = \lambda(t)$ .

For the reliability function according to hypothesis **D**, the Poisson distribution law is adopted. When  $k = 5$  the function has the form:

$$P(t) = 1 - 0,008333 \cdot (\lambda(t)t)^5 e^{-\lambda(t)t}. \tag{33}$$

where  $P_t$  – the probability that the element will enter state  $k$  within the time  $t < T_k$ .

Thus, at a given failure rate  $\lambda$ , dependence (33) establishes a relationship between the reliability of the element  $P_t$  in  $i$ - state and time  $t$ , passed from the start of the operation to state  $i=2, \dots, 5$ .

**Transition probabilities matrix. Model A.** The model is represented by the process, whose graph is shown in Fig. 1. This is a discrete process with continuous time. The system can sequentially move from one neighbouring state to another with a larger number, or stay in any of them. State 5 is absorbing. This means that the system does not have the exit of state 5.

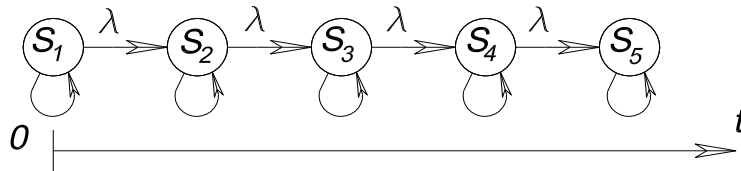


Fig. 1. Model A. Process graph

Let's define matrix  $\mathbf{P}(i, t)$  and matrix  $\mathbf{E}$  by the Kolmogorov–Chapman equations (17). To simplify writing matrix elements, their shape will be changed slightly. In the future, the argument  $t$  with the transition probability  $p_i(t)$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$  and transition intensities  $\lambda(t)$  and argument  $(i, t)$  at matrix  $\mathbf{P}(i, t)$  will not be written.

In model A, let's set the transition intensities independent of the step and time:

$$\lambda_{ij}(t) = \lambda(t) = \lambda. \tag{34}$$

Matrix  $\mathbf{E}$  will look like this:

$$\mathbf{E}^T = [\lambda \ \lambda \ \lambda \ \lambda], \tag{35}$$

and equation (20) in this case is simplified and written as follows:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \lambda\mathbf{P} \tag{36}$$

According to the process graph of model A, the system of equations (36) will be:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \lambda \cdot \begin{bmatrix} -p_1 & 0 \\ -p_2 & p_1 \\ -p_3 & p_2 \\ -p_4 & p_3 \end{bmatrix}, \tag{37}$$

Integrating the system of equations (37) under conditions (21, 22) gives the values of the transition matrix elements:

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} 0,9900 & 0,0100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9802 & 0,0198 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,9704 & 0,0296 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9608 & 0,0392 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{38}$$

The initial unconditional probability is accepted  $p_k = 0.9998$  ( $\beta=3.8$ . Here  $\beta$  is the safety characteristic, and the numerical parameter is related to reliability by the relation:  $Pt = \Phi(\beta)$ , where  $\Phi$  is the standard function of the normal distribution), which corresponds to the minimum standard value of the design reliability in state 1. By formula (21), an unconditional probabilities vector is obtained in state  $j$ :

$$\mathbf{P}_j = [0,9998 \quad 0,9899 \quad 0,9703 \quad 0,9416 \quad 0,9047]^T. \quad (39)$$

According to the known unconditional probabilities vector of the system in state  $j = 1, 2, \dots, 5$  degradation curves are defined, i.e. a family of implementations of a stochastic process, each of which, at a given value of the failure intensity parameter,  $\lambda$  gives *transition time forecast* from state  $j$  into state  $j + 1$  [8, 9].

**Model B.** Model A describes the stochastic process of gradual accumulation of damage. In reality, the ageing process of a structure element consists not only of gradual failures but also of sudden ones. This is exactly what model B is. In it the process of damage accumulation contains sudden "jumps" over one state, as shown in the process graph Fig. 2.

It is also a discrete process with continuous time, with evenly distributed time intervals between the states. The system can remain in any of them, sequentially move from one neighbouring state  $S_i$  to another one with a larger number  $S_{i+1}$ , or jump over a nearby state  $S_{i+1}$  to the next one  $S_{i+2}$ . State 5 – absorbing.

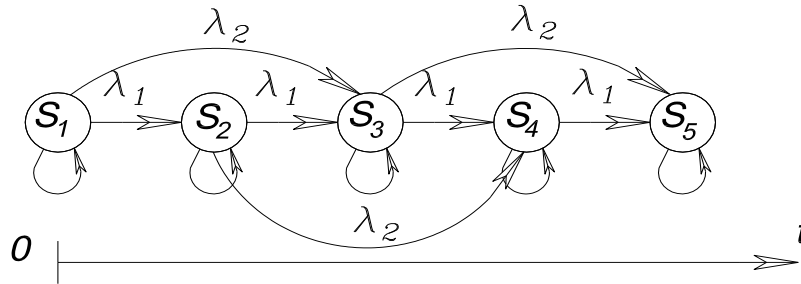


Fig. 2. Model B. Process graph

According to the process graph of model B (fig. 2) the system of equations (17) will be:

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \begin{bmatrix} -\varphi p_1 & 0 & 0 \\ -\varphi p_2 & \lambda_1 p_1 & 0 \\ -\varphi p_3 & \lambda_1 p_2 & \lambda_2 p_1 \\ -\lambda_1 p_4 & \lambda_1 p_3 & \lambda_2 p_2 \end{bmatrix}, \quad (40)$$

here  $\lambda_1$  transition intensity from state  $S_i$  in state  $S_{i+1}$ ;  $\lambda_2$  – transition intensity from state  $S_i$  in state  $S_{i+2}$ ;  $\varphi = \lambda_1 + \lambda_2$ .

The transition intensity to the neighbouring state is assumed  $\lambda_1$  and the "jump" transition intensity  $\lambda_2 = 0,05 \cdot \lambda_1$ . The numerical solution of the system of differential equations (40) by the Runge-Kutt method gives the values of conditional transition probabilities from which the transition matrix is formed:

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} 0,9851 & 0,0049 & 0,0100 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9704 & 0,0097 & 0,0199 & 0 \\ 0 & 0 & 0,9560 & 0,044 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9418 & 0,0582 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (41)$$

The initial unconditional probability is assumed, as for model A  $p_k = 0.9998$  ( $\beta = 3.8$ ) and by the known values of conditional transition probabilities  $\mathbf{P}_0$  and by formula (24) an unconditional probabilities vector is obtained in state  $j$  of a stochastic system of model type B:

$$\mathbf{P}_j = [0,9998 \ 0,9849 \ 0,9558 \ 0,9138 \ 0,8605]^T. \quad (42)$$

As expected, the probability in states 2-5 is lower compared to model A, which can be interpreted as an implementation in the process of sudden failures.

**Determining the failure rate parameter.** Determination of the failure intensity parameter is the dominant feature of the Markov phenomenological model of accumulation of damage to construction structure elements. As seen from dependency (36), the only parameter of lifecycle management is the failure rate  $\lambda$ . In the model under consideration, the parameter  $\lambda$  is determined by solving equation (33) under the initial conditions for an individual element obtained from the survey results. The procedure for determining the parameter  $\lambda$  was first proposed in 1999. It is in a specific definition of the initial conditions for equation (36) with respect to an unknown parameter  $\lambda$ :

– reliability  $P_{t,i}$  is related to a specific task  $i$ -th technical condition. This value becomes known as soon as the discrete state of the element is classified according to the survey data, and  $t_i$  – the time elapsed from the start of operation of the element to state  $i$ . Time  $t_i$  is known from the technical documentation of the bridge. A graphical interpretation of the parameter determination procedure is given in Fig. 3.

It is obvious that the proposed method for determining the parameter value  $\lambda$  of a structural element that controls the "nowadays", that is, with  $i$ -th discrete state, a life cycle model, provides complete information about the load history in "the past", and not only that. The failure rate parameter defined by this procedure  $\lambda$  contains a lot of other information about the operation of the facility, related to the characteristics of the environment, the level of loading effects, the quality of construction, design features, etc.

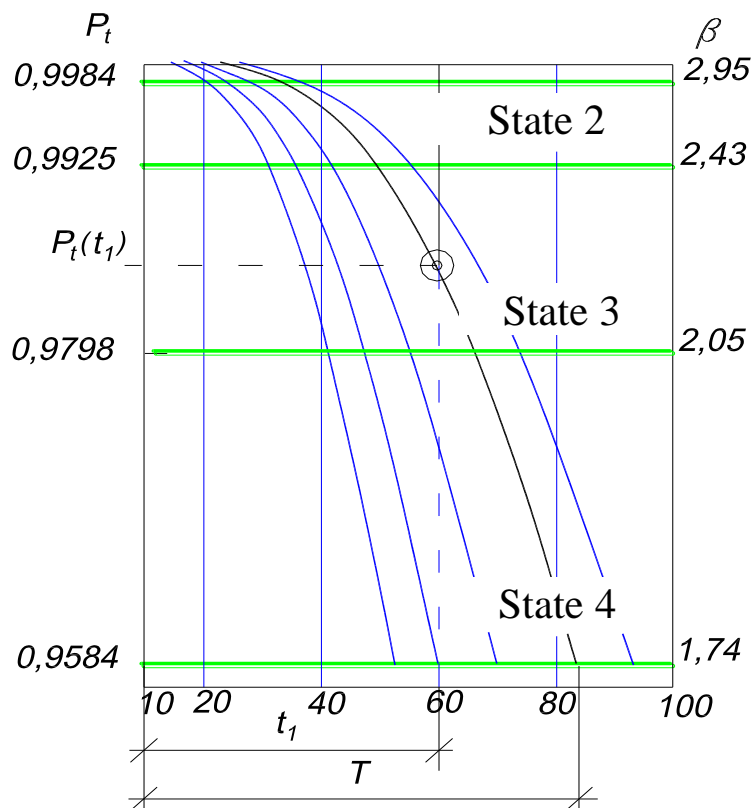


Fig. 3. Graphical interpretation of the failure intensity parameter definition  $\lambda$

**Predicting the remaining resource of the element.** The forecast of the remaining resource is determined, again, by solving the degradation equation (36). The initial data for solving the equation is now the reliability of element  $P_{t,5}$  – the limit value of reliability in the 5th operational state and the parameter of the element failure rate determined in the previous step from equation (36)  $\lambda$ .

The time determined under these initial conditions is  $T_5$  – that is, the time that passes from the current state of the element to the fifth operational state and is the remaining resource.

An example of the model implementation is the new regulatory documents for the system of road bridges' operation in Ukraine [5, 6].

**Analysis of model. A.** As seen from the above formulation, the model is theoretically strictly justified. However, the fact that the model is phenomenological requires a deep insight into the physical essence of the described process, because it is necessary not only to adequately describe each of the discrete states but also to establish changes in parameters correctly within one discrete state, while the simulated process is continuous.

**B.** The decision on the number of discrete states representing the life cycle of an element is quite subjective. It is clear that the more discrete states there are, the more accurately the continuous process of damage accumulation is described. On the other hand, describing a large number of discrete states requires a significant expansion of the database of reliable full-scale data. The model developer decides where the reasonable satisfaction of these conflicting requirements is.

**B.** An important theoretical side of the model is the graph of the element degradation process. The graph of the model, which depends on the number of discrete states and the connections between them, will always be the subject of special attention on the part of the researcher, and will always reflect his subjective idea of the essence and regularities of the process.

**Г.** Another fundamentally important aspect of the model is the question of the developer's definition of the failure intensity function  $\lambda(t)$ , which is generally a random function of time. However, there is no standard procedure here, and the researcher has to look for special techniques for determining this basic parameter of model control.

**The economic effect of forecasting the resource of hydraulic structures.** Assessment of the possible economic effect of forecasting the resource of construction structures is performed according to criterion  $Z_{3p}$ , which takes into account the operating costs of managing the object's state. The minimum goal function is obtained with *using the penalty method*:

$$Z_{3p} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left( \frac{C_{i,t}(S_{i,t})}{BI_{i,t} \cdot (1+r)^t} \cdot \left[ 1 + \max\left(\frac{\beta_{\min} - \beta_{i,t}}{\beta_{\min}}, 0\right) \right] \right) \Rightarrow \min, \quad (43)$$

where  $C_{i,t}$  – operating expenses for managing the condition of the construction structure  $i$  per year  $t$ , UAH;  $S_{i,t}$  – operational condition;  $\beta_{\min}$  – minimum allowable value of the safety characteristic;  $\beta_{i,t}$  – a value of the safety characteristic of the  $i$ -th construction structure per year  $t$ ;  $r$  – discount rate adjusted for the inflation rate,  $BI_{i,t}$  – importance factor (priority)  $i$ -th element at the beginning of the year  $t$ .

The time-dependent priority of a construction structure is determined by formula:

$$BI_k(t) = \sum_{i=1}^{N_{Ft}} w_i \cdot f_{ik}(t) + \sum_{i=1}^{N_F} w_i \cdot f_{ik}, \quad (44)$$

where  $N_{Ft}$  – the number of factors of influence that depend on time  $t$ , in years;  $N_F$  – the number of factors of influence that do not depend on time;  $w_i$  – normalized impact factor  $i$ -th factor,

(established by experts using the Saati method,  $\sum_{i=1}^{N_F} w_i = 1$ );  $f_i$  – dimensionless value of importance  $i$ -

the structure element determined by an expert.

Thus, criterion  $Z_{3p}$  – is the number of operating expenses adjusted for the penalty ratio. If the safety characteristic  $\beta$  falls below the specified minimum allowable value of the function value  $Z_{3p}$  will increase, which serves as a barrier to an unjustified decrease in the permissible value of  $\beta_{\min}$

security features. Through fines, the achieved condition of the facility is taken into account, and better condition means minimizing operating costs and maximizing external positive effects.

The minimum allowable level  $\beta_{\min}$  is set based on an economic justification, but it cannot be less than the maximum permissible limit for the safety requirements for the operation of a construction structure element, for example, less than 1.74.

**Conclusions.** Assessment of the possible economic effect of forecasting the resource of hydraulic structures is performed according to Z criterion<sub>3p</sub>. It represents the number of operating expenses adjusted for the penalty ratio. When the safety characteristic  $\beta$  falls below the specified minimum allowable value, the value of the function  $Z_{3p}$  will increase, which serves as a barrier for unjustified reduction of the allowable value  $\beta_{\min}$  of the safety characteristic. Through fines, the achieved condition of the facility is taken into account, and better condition means minimizing operating costs and maximizing external positive effects. The minimum allowable level  $\beta_{\min}$  is set based on the economic justification, but it cannot be less than the maximum permissible limit for the safety requirements for the operation of hydraulic structures.

The reliability function describes the process of degradation of hydraulic structures during the life cycle, that is, the relationship between reliability and the operating time of the element is established. It is postulated that the degradation rate is described by one parameter – an indicator of the failure rate. This indicator is assumed constant, independent of time.

### References

- [1] DBN V.2.3-6:2009. Mosty ta truby. Obstezhennia i vyprobuvannia. Vyd. ofits. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2009.
- [2] DSTU-N B.V.2.3-23:2012. Nastanova z otsiniuvannia i prohnozuvannia tekhnichnoho stanu avtodorozhnikh mostiv, Minrehionbud Ukrainy, K.: 2012.
- [3] A.I. Lantukh-Liashchenko, "Do proektu derzhavnykh budivelnykh norm z otsinky tekhnichnoho stanu mostiv", *Zbirnyk «Diahnostyka, dohovichnist ta rekonstruktsiia mostiv i budivelnykh konstruktsii*, vyp. 1, pp. 78-83, 2000.
- [4] A.Y. Lantukh-Liashchenko, "K voprosu o «pamiaty» markovskoi modely nakopleniia povrezhdenyi", *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V.Lazariana*, vyp. 33, pp. 150-155, 2010.
- [5] A.Y. Lantukh-Liashchenko, "Markovskye modely nakopleniia povrezhdenyi", *Nauka y yskusstvo. Naukovo-vyrobnychi zhurnal «Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy»*, no. 2, pp. 22-25, 2009.
- [6] A.I. Lantukh-Liashchenko, "Normatyvne rehuliuвання u sferi proektuvannia i ekspluatatsii mostiv", *Visnyk KhNADU*, no. 58, pp. 7-15, 2015.
- [7] A.I. Lantukh-Liashchenko, "Otsinka nadiinosti sporudy za modelliu markovskoho vypadkovoho protsesu z dyskretnymy stanamy", *Zbirnyk Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*, K.: 1999.
- [8] A.I. Lantukh-Liashchenko, "Suchasni teoretychni zasady vyznachennia nadiinosti mostiv", *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo: zb. nauk. pr.*, vyp. 64, pp. 155-165, 2002.
- [9] A.I. Lantukh-Liashchenko, "Utochnennia otsinky ekspluatatsiinoho stanu mostiv", *Zbirnyk «Dorohy i mosty»*, vyp. 9, pp. 12-18, 2008.
- [10] Y.I. Luchko, P.M. Koval, M.M. Korniiiev, A.Y. Lantukh-Liashchenko, M.R. Kharkhalis *Mosty: konstruktsii ta nadiinist*, Monohrafiia. Lviv Kameniar, 2005.
- [11] Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruktsii, sporud ta mashyn. *Zb. naukovykh statei*. Instytut elektrozvaryuvannia im. Ye.O.Patona NAN Ukrainy. K.: 2006.
- [12] J. L. Bogdanoff, "A New Cumulative Damage Model", *Journal of Applied Mechanics*, Part 1, vol. 45, pp. 246-250, 1978.
- [13] J. L. Bogdanoff, W. Krieger, "A New cumulative damage model", *Journal of Applied Mechanics*, Part 2, vol. 45, pp. 251-257, 1978.

- [14] DuraCrete, Probabilistic Methods for Durability Design, Document BE95 – 1347/R0, The European Union – Brite EuRam III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, CUR, Gouda, 1999.
- [15] JCSS Probabilistic Model Code. Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001.
- [16] JCSS: Background documentation, Part 1 of EC 1 Basis of design, 1996.
- [17] JCSS: Probabilistic model code. JCSS working materials, 2001. [Online]. Available: <http://www.jcss.ethz.ch/>
- [18] A. Lantoukh-Liashchenko, "Reliability based Service Life Prediction of Concrete Bridge Superstructures", *Proceeding EKO MOST 2006. Durable bridge structures in the environment*, p. 255-261, 2006.
- [19] A. Lantoukh-Liashchenko, "Markov chain models for the residual service life prediction of bridges", *4-th International Conference FOOTBRIDGE 2011*: Wroclaw, Poland, pp. 1386-1393, 2011.
- [20] Markov Chain, *Based Life Cycle Cost (LCC) Analysis*. Part 2: Reference Structure Models for Prediction of Degradation. LIFECON Deliverable D2.2. [Online]. Available: <http://lifecon.vtt.fi/d22.pdf>. Accessed on: May 13, 2017.
- [21] R.E. Melchers, *Structural Reliability Analysis and Prediction*. Second Edition. John Wiley & Sons. 1999.

## ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ КОНСТРУКЦІЙ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

<sup>1</sup>Онищенко А.М., д.т.н., професор,  
onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1040-4530

<sup>1</sup>Лантух-Лященко А.І., д.т.н., професор,  
albert.lantoukh@gmail.com, ORCID 0000-0002-6642-2359

<sup>2</sup>Ковальчук В.В., д.т.н., доцент,  
kovalchuk.diit@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4350-1756

<sup>1</sup>Карнаков І.А., аспірант,  
ihor.karnakov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8751-9934

<sup>1</sup>Національний транспортний університет  
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010, Україна

<sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка»  
вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

**Анотація.** Встановлено, що в термінах дискретного марковського процесу задача зводиться до пошуку безумовних ймовірностей перебування системи  $S$  на довільному кроці  $k$  в стані  $S_i$ , тобто отримання матриці перехідних ймовірностей. В такому формулюванні модель служить для: оцінки технічного стану елемента; оцінки рівня безпеки експлуатації елементів конструкції; ранжирування елементів за потребою ремонтів, реконструкції або заміни; в стратегічному плануванні видатків на ремонт або реконструкцію за умов обмеженого фінансування та прогнозу залишкового ресурсу елементів.

Встановлено, що теоретичним базисом дослідження, що має за мету прогнозування ресурсу гідротехнічних споруд у процесі експлуатації, є марковська теорія випадкових процесів. Для математичного опису процесу деградації елементів найбільш вдалим є математичний апарат випадкових марковських процесів.

Визначення параметра інтенсивності відмов є домінантою марковської феноменологічної моделі накопичення пошкоджень елементів гідротехнічних споруд. Єдиним параметром управління життєвим циклом є інтенсивність відмов  $\lambda$ . В моделі, що розглядається, параметр  $\lambda$  визначається за початкових умов для окремого елемента, отриманих за результатами обстеження.

За рахунок того, що параметр  $\lambda$  визначається для окремого елемента і має уточнюватися кожного разу після чергового обстеження, точність моделі підвищиться. Модель, що пропонується, є інтегральною. Вона не містить явного теоретичного апарату чуйного до матеріалу елементу, його статичної схеми, технології спорудження, екологічних умов та такого іншого. З іншого боку, всі названі фактори і багато інших, другорядних, беруться до уваги в моделі в момент, коли за допомогою класифікаційних таблиць, що містять фізичні і механічні ознаки деградації, визначається стан елемента.

В теорії споруд поширеним є статистичний підхід формулювання матриці переходів, в основі якого лежать історичні дані системи експлуатації споруди. Вважається, що матриця переходів розбудована за даними системи експлуатації є більш реалістичною основою для прогнозу процесів деградації споруд. Практичному застосуванню матриці переходів розбудованої за статистичними даними присвячена велика кількість зарубіжних досліджень в яких розглядаються особливості матриць переходів пов'язані з системою експлуатації мостів різних країн. В такій постановці кожен елемент матриці перехідних ймовірностей  $P$  є ймовірність того, що система яка була в стані  $i$  перейде в стан  $j$  за один крок (тобто за один рік). При цьому вважається що відсутні експлуатаційні втручання, тому піддіагональні елементи є нульовими. Як і раніше сума елементів одної строки дорівнює 1 і елемент  $p_{ij} = 1$  тому як стан  $j$  є поглинаючим.

Для алгоритму реалізації моделі марковського ланцюга для прогнозування технічного стану гідротехнічних споруд в цілому вихідними даними є: статистичні дані розподілу споруд по станам на час прогнозу, рейтингова оцінка споруди обчислена експертом згідно шкали та час прогнозу в роках.

Встановлено, що деградаційні властивості конструкцій споруд описуються двома параметрами: критерієм деградації та інтенсивністю відмов. Критерієм деградації може бути прийнятий будь-який фактор напружено-деформованого стану: надійність, внутрішні зусилля, деформації. Критерієм деградації може виступати довільна рейтингова оцінка. В нашому випадку за критерій деградації приймається надійність елемента, як найбільш загальний фактор напружено-деформованого стану.

**Ключові слова:** гідротехнічні споруди, деградація конструкцій споруд, Марковська модель, термін служби.

Стаття надійшла до редакції 12.03.2023

**NUMERICAL SIMULATION OF WAVE DAMPENING BY A STRUCTURE OF THE HYDRO-ENGINEERING FACILITY IN COMPLETE VERTICAL PROFILE**

<sup>1</sup>**Synytsia R.V.**, Ph.D., Associate Professor,  
sinita\_roma@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6796-4785

<sup>1</sup>**Osadchiy V.S.**, Ph.D., Associate Professor,  
ovs-55@bk.ru, ORCID: 0000-0002-0611-4944

<sup>1</sup>**Dmytriiev S.V.**, Ph.D., Associate Professor,  
tele@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6396-9060

<sup>1</sup>*Odessa State Academy of Construction and Architecture*  
Didrichson str, 4, Odessa, 65029, Ukraine

**Abstract.** The article describes the issues of numerical experimental research related to the determination of the magnitude of the waves damping when they overflow through the upper structure of a protective hydraulic structure (PHS) of an incomplete vertical profile. The presented studies were carried out in order to verify the results of physical experimental studies. Physical experimental studies were carried out in the hydrowave laboratory of the Hydrotechnical Construction Department of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. The numerical model of the design of the PHS of an incomplete vertical profile was made similar to the conditions of the full-scale section of the coast of the Odessa Bay. The design of the PHS of an incomplete vertical profile is supposed to be located at a distance  $L = 200$  (m) from the coastline of the protected area. At the location of the designed protective structure, the estimated water depth  $d = 4.0$  (m). Having built the rays of refraction and transformation of waves when the waves approach the designed structure, the calculated wave height will be  $h = 2.4$  (m); average wavelength  $\lambda = 24.5$  (m); the elevation of the upper structure of the PHS with an incomplete vertical profile relative to the calm water level was taken equal to  $\Delta H = +1.0$  (m), the width of the superstructure of the protective structure  $B = 4.0$  (m). As a result of numerical experiments, the height of the damped wave when it overflows through the upper structure of the PHS structure with an incomplete vertical profile onto the protected water area was  $h_{tr} = 0.6$  (m). The results of numerical simulation differ by  $-3.3\%$  from the wave height obtained during the physical experiment.

The use of PHS structures of an incomplete vertical profile, in order to protect the water areas of seaports, as well as elements of the coastal infrastructure of sea cities, will increase the investment attractiveness of creating new projects of protective and coastal protection structures, due to a decrease in the elevation of the surface part.

**Keywords:** numerical modeling, barrier hydraulic structure of incomplete vertical profile, wave damping.

**Introduction.** In the practice of building fencing and bank protection hydraulic structures, structures of an incomplete vertical profile are used. Protective hydraulic structures (PHS) of an incomplete vertical profile include structures that allow partial overflow of wave crests through their upper structure to the protected water area with a further change in the main wave parameters. However, in the regulatory documents of many countries on the design of hydraulic structures and publications of various researchers, there are no scientifically based practical recommendations that allow determining the magnitude of wave damping by structures of this type.

The obtained results of numerical simulation differ from the wave height obtained during a physical experiment, the results of which were presented in publications [1-3]. An empirical dependence designed to determine the magnitude of wave damping during their overflow through the upper structure of the PHS structures of an incomplete vertical profile was presented in the publication [4].

Numerical modelling is increasingly being used to study complex physical processes that will be observed during the operation of real objects. The use of numerical methods can significantly reduce the

time when creating complex models, reduce financial costs when conducting research and performing fine-tuning (calibration) of the investigated structures of the PHS of an incomplete vertical profile.

Improving the design of hydraulic structures, increasing their reliability and reducing costs is directly related to the improvement of engineering calculation methods. In modern times, the VOF (Volume-of-Fluid) method is widely used in hydrodynamic calculations, which uses the volumetric part of the liquid in the middle of the calculated volume of the finite element mesh as a marker option. This approach was proposed in [5] and has several varieties that differ in the way the marker functions are used or the way in which boundary conditions are set at the media interface [6].

The results of the numerical study presented in the article, related to the determination of the magnitude of wave damping during their overflow through the upper structure of the PHS structure of an incomplete vertical profile onto the protected water area, were obtained in order to verify the results of physical experiments and confirm the reliability of the method designed to determine the values of wave damping by PHS structures incomplete vertical profile.

**Analysis of recent research.** The conducted literature review showed that studies on the issues of wave damping, and designs of PHS of an incomplete vertical profile, were carried out both in the Soviet Union and abroad. However, to date, there are no practical recommendations in the literature that can be used in engineering practice.

Experimental data from laboratory studies with the frontal wave approach were presented in the publication of O.Yu. Birskaia [7]. In order to determine the wave damping coefficients, which was recommended for use, the formula (1):

$$k_{BR} = \frac{h - h_0}{h} = \sqrt{\frac{h}{\lambda}} \cdot \left( 0.23 \frac{B}{h} + 2.3 \frac{\Delta H}{h} + 1.6 \right), \quad (1)$$

where:  $h$  – source wave height (m);

$h_0$  – residual wave height between the breakwater and the shore (m);

$\lambda$  – source wave length (m);

$\Delta H$  – elevation of the top of the structure relative to the calculated water level (m);

$B$  – ridge width (m).

Having analyzed and compared the results of similar experimental studies related to the determination of the magnitude of wave damping during overflow through the upper structure of the incomplete profile PHS structures made of rock placement, published by (Seeling [8]; Allsop [9-11]; Kobayashi [12]); Sorensen [13], Koohestani [14], Cuomo [15], d'Angremond [16] proposed to use the following relation (2):

$$k_t = -0.4 \frac{R_s}{H_i} + 0.80 \cdot \left( \frac{B}{H_i} \right)^{-0.31} \cdot (1 - e^{-0.5\zeta}), \quad (2)$$

where:  $R_s$  – elevation of the top of the structure relative to the calculated water level (m);

$H_i$  – source wave height (m);

$B$  – ridge width (m);

$\zeta$  – coefficient taking into account the influence of the location of the breakwater in relation to the wave profile, determined by the formula (3);

$$\zeta = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_i / L_0}}, \quad (3)$$

where:  $\alpha$  – angle of propagation of the wave beam with respect to the longitudinal axis of the structure.

Having processed numerous experimental data of wave actions on the PHS of an incomplete vertical profile, Briganti and others [17] in 2003 proposed an empirical dependence (4):

$$k_t = -0.35 \cdot \frac{R_s}{H_i} + 0.51 \cdot \left( \frac{B}{H_i} \right)^{-0.65} \cdot (1 - e^{-0.41\zeta}), \quad (4)$$

where:  $h_s$  – elevation of the top of the structure relative to the calculated water level (m);

$H_i$  – source wave height (m);

$B$  – ridge width (m).

**The aim of the work** was to conduct a numerical experimental study in the ANSYS Fluent software package, related to determining the magnitude of the damping of waves when they overflow through the upper structure of the PHS structure of an incomplete vertical profile onto the protected water area. The studies presented in the publication were carried out in order to verify the previously obtained results of physical experiments, and confirm the reliability of the proposed empirical dependence presented in the publication [4].

**Research methods.** In the practice of building protective hydraulic structures, structures of an incomplete vertical profile are used (Fig. 1), through the upper structure of which it is allowed, overflow of wave crests with a further change in their main wave parameters. These structures, depending on the conditions of use, can be exposed to both standing and breaking waves.

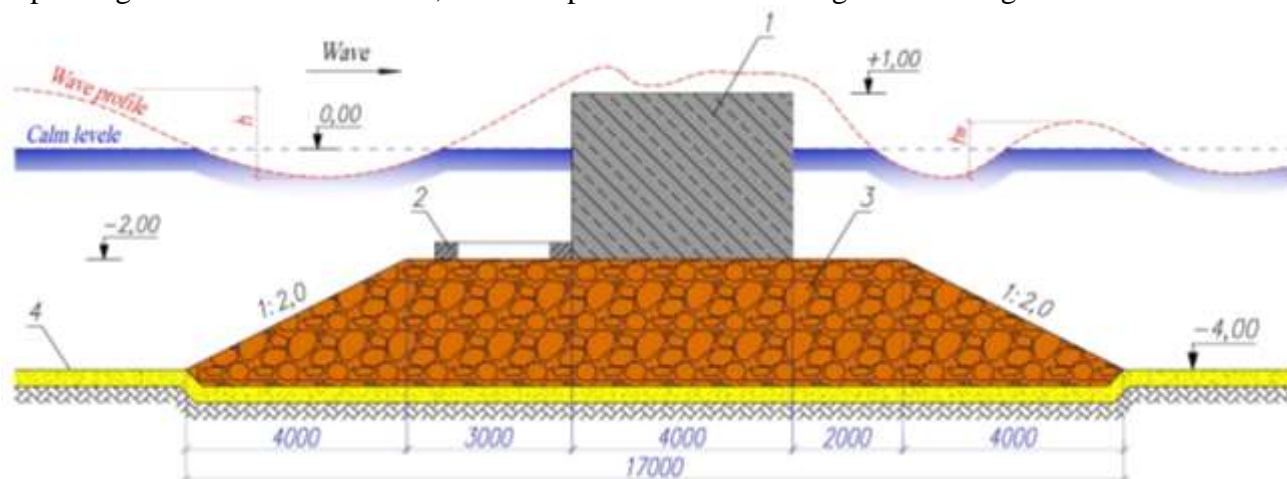


Fig. 1. Cross section of the construction of a breakwater of an incomplete vertical profile:  
1 – concrete mass; 2 – pregnant massif (slotted plate); 3 – stone base















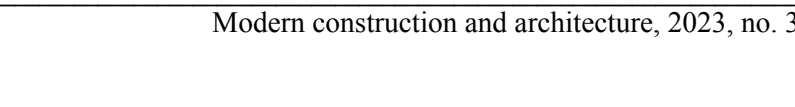
Permissible wave heights expected in protected areas of urban infrastructure are regulated by the parameters of preserving seashores and beach material and preventing flooding of coastal areas due to the impact of storms of rare frequency. In cases of protection from wave impacts of seaport territories, it is recommended to take the permissible wave heights  $\leq 1.2$  (m). These conditions are established on the basis of the possibility of mooring operations, as well as ensuring, at the moment of contact of ships with the fenders of berthing facilities, the normal component of the speed of approach to the berths.

The project [18] is considered as an example. The design of the PHS of an incomplete vertical profile presented in the article was supposed to be located at a distance  $L = 200$  (m) from the coastline of the protected territory of the Odessa Agricultural Engineering Plant. At the location of the designed protective structure, the water depth  $d = 4.0$  (m). Having built the rays of refraction and transformation of waves when they approach the designed structure, the calculated wave height will be  $h = 2.4$  (m), average wavelength  $\lambda = 24.5$  (m), the elevation of the upper structure of the PHS of an incomplete vertical profile relative to the calm water level will be  $\Delta H = +1.0$  (m), the width of the upper structure of the protective structure  $B = 4.0$  (m). In accordance with the calculations, it was found that in order to avoid flooding the protected area of the plant, the permissible wave height should not exceed  $h_{tr} < 1.5$  (m).

**Research results.** The authors of the article carried out numerical studies in order to verify the previously obtained results of physical modelling presented in publications [1-3]. The task of the study was to determine the magnitude of the waves damping when they overflow through the upper structure of the PHS structure of an incomplete vertical profile. Numerical simulation was carried out using the ANSYS Fluent software package. When modelling, a numerical model was used, the length of which was 70 meters, and the height was 9.5 meters.

The results obtained during the numerical simulation are presented in Table 1.

Table 1 – Numerical simulation results

№	Wave transformation by design protective hydraulic structure incomplete vertical profile	Time from start of simulation	Suppressed wave height
1		4 second	-
2		5 second	-
3		6 second	-
4		7 second	-
5		8 second	-
6		9 second	0.10 m
7		10 second	0.15 m
8		11 second	0.20 m
9		12 second	0.25 m
10		13 second	0.30 m
11		17 second	0.35 m
12		18 second	0.40 m
13		19 second	0.60 m
14		20 second	0.60 m
15		21 second	0.60 m

In accordance with the obtained results of numerical modeling related to determining the magnitude of wave damping by the PHS design of an incomplete vertical profile, when waves overflow through the upper structure to the protected water area, under the accepted boundary conditions, the damped wave height was  $h_{tr} = 0.6$  m (Fig. 2).

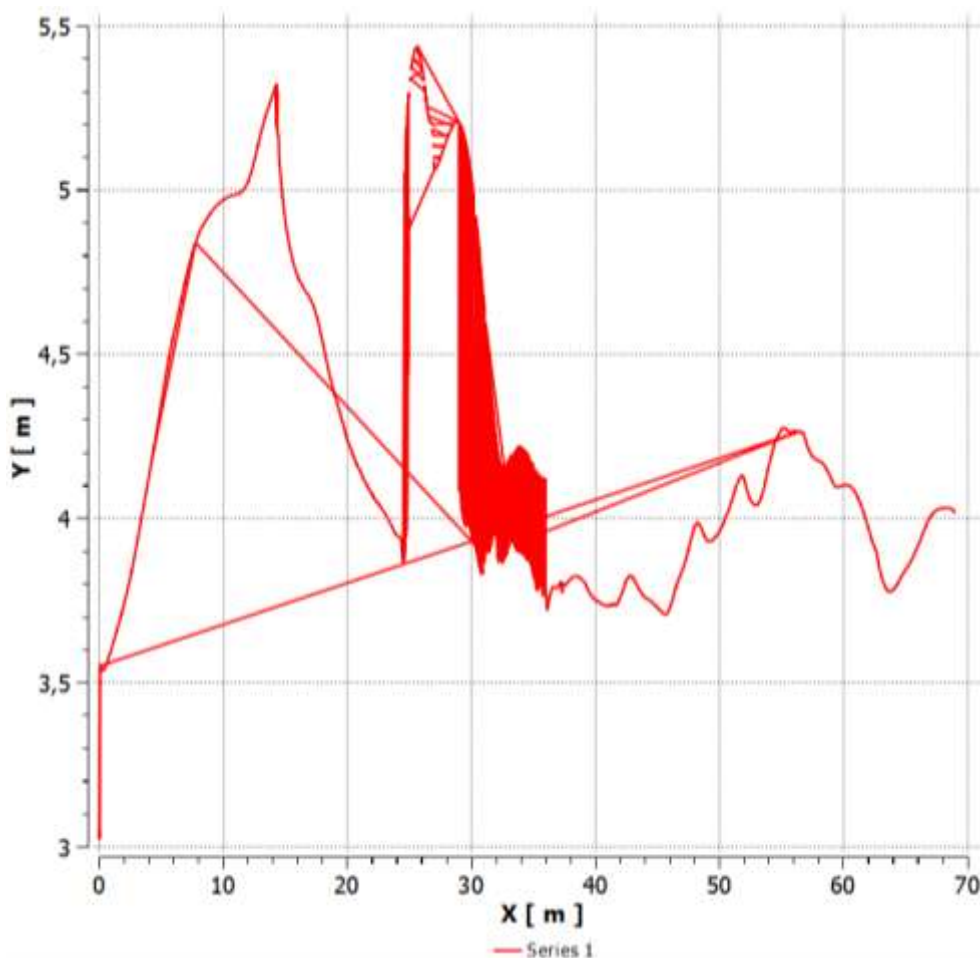


Fig. 2. The level of the free surface of the water during the numerical simulation (21 seconds from the start of the experiment)

In the presented studies, a time interval of up to 21 seconds from the start of the numerical simulation was considered, which made it possible to fully evaluate the wave pattern both in the protected water area itself and in front of the PHS design of an incomplete vertical profile.

The analysis of the vectors and fields of the velocities of movement of water particles in a wave under the influence of an incomplete vertical profile on the PHS structure, in order to establish the magnitude of the waves damping, was carried out on the basis of graphic materials, which were selectively presented in Fig. 3-17. The visualizations show the trajectories of wave movements, which are formed by the velocity vectors of the movement of water particles at the location of the protective structure. Visualizations are reviewed at set time intervals, which were considered in steps of 1 second for a reliable analysis. The accepted duration of the experiment was 21 seconds, which was due to the period and length of the calculated wave, which was used as the boundary condition of the numerical experiment. The criterion for the accepted time interval was the need to stabilize the cyclic recurrence of the movement of the wave profile, which occurred after the passage of at least three cancelled waves to the protected water area.

The results of the numerical simulation at a time equal to 4 seconds from the beginning of the experiment are presented in Fig. 3.

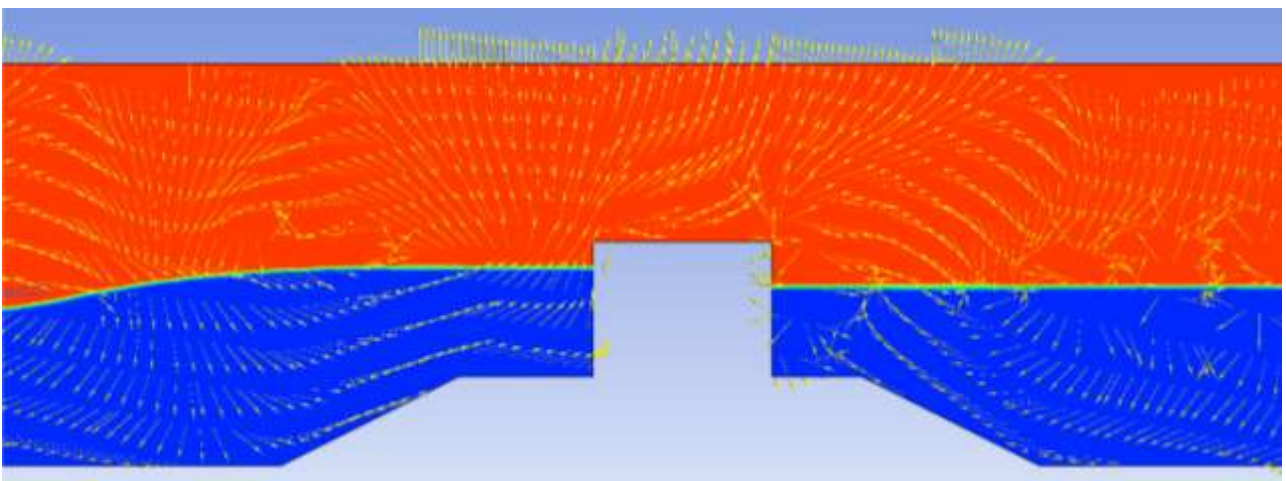


Fig. 3. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 4 seconds from the beginning of the numerical experiment

In the process of processing the results of the numerical experiment, it was found that the calculated wave, which is formed on the left side of the model (Fig. 3) during its movement, first of all, meets with the influence of the stone base, while partially changing the trajectory of the particles water. With further movement, the transformed wave meets a vertical barrier, and is partially reflected from the upper structure of the PHS structure of an incomplete vertical profile. From this point in time and up to a period equal to 8 seconds (Fig. 7), a standing wave is formed on the left side of the structure, and a calm surface of the water is observed in the protected area. Partial penetration of wave crests into the protected water area begins to appear starting from 10 seconds (Fig. 9) from the start of the numerical experiment, while the formation of a damped wave is observed, which increases with the time of the numerical experiment.

The results of the calculations at the time of 5 seconds from the start of the numerical experiment are shown in Fig. 4.

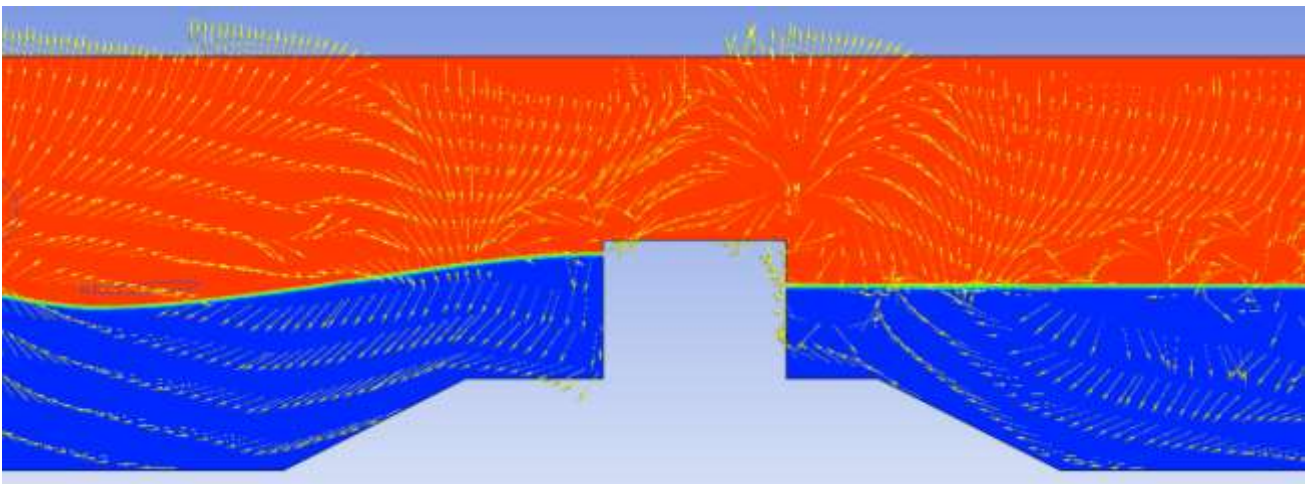


Fig. 4. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 5 seconds from the beginning of the numerical experiment

The results of the calculations at the time of 6 seconds from the start of the numerical experiment are shown in Fig. 5.

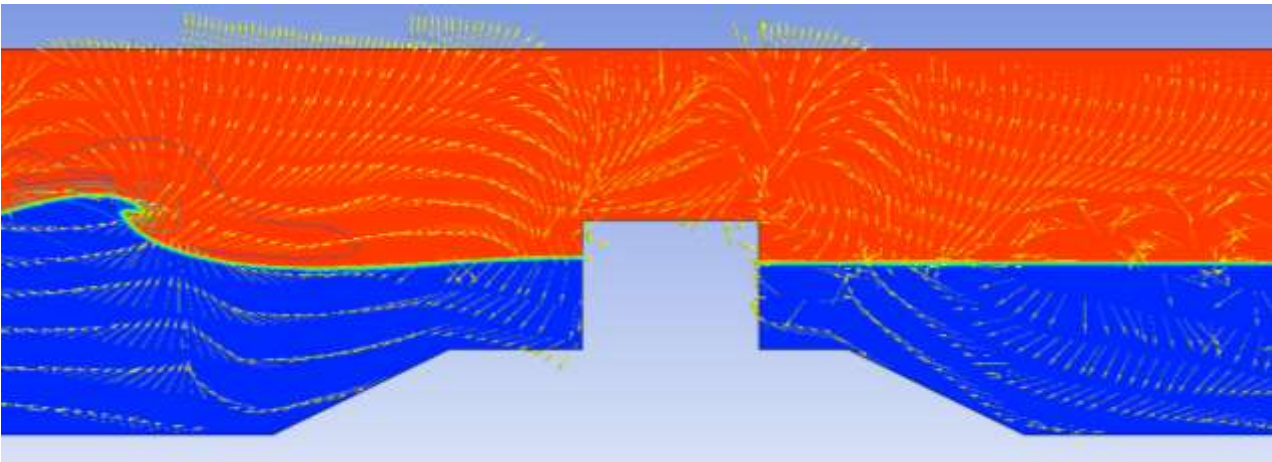


Fig. 5. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 6 seconds from the beginning of the numerical experiment

The results of the calculations at the time of 7 seconds from the start of the numerical experiment are shown in Fig. 6.

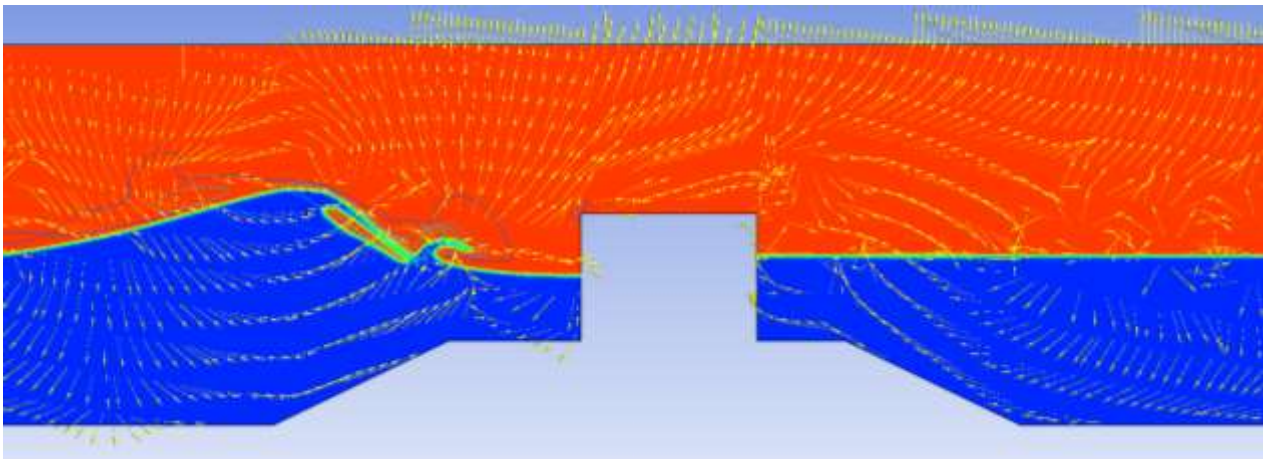


Fig. 6. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 7 seconds from the beginning of the numerical experiment

The results of the calculations at the time of 8 seconds from the start of the numerical experiment are shown in Fig. 7.

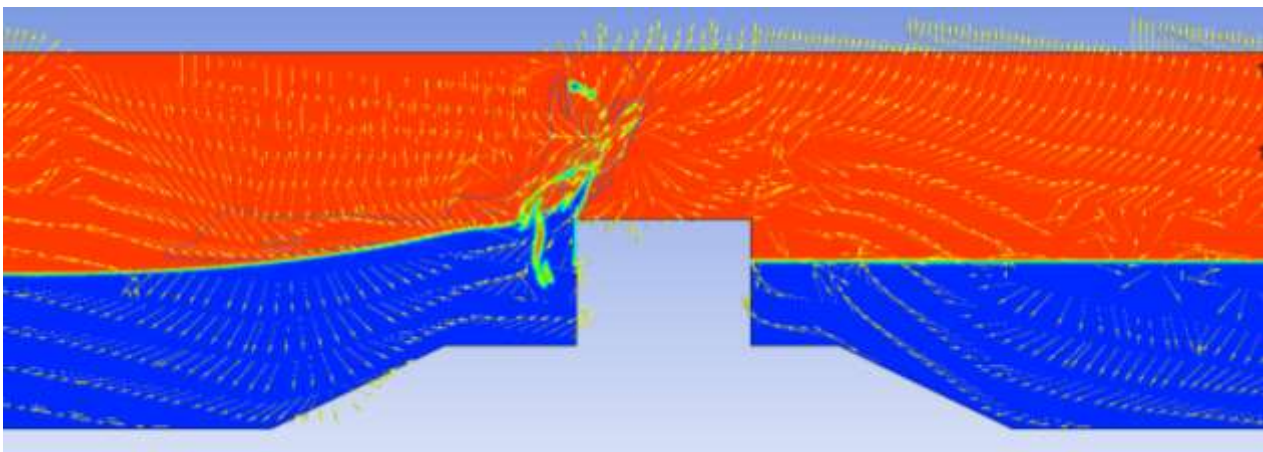


Fig. 7. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 8 seconds from the beginning of the numerical experiment

The results of the calculations at the time of 9 seconds from the start of the numerical experiment are shown in Fig. 8.

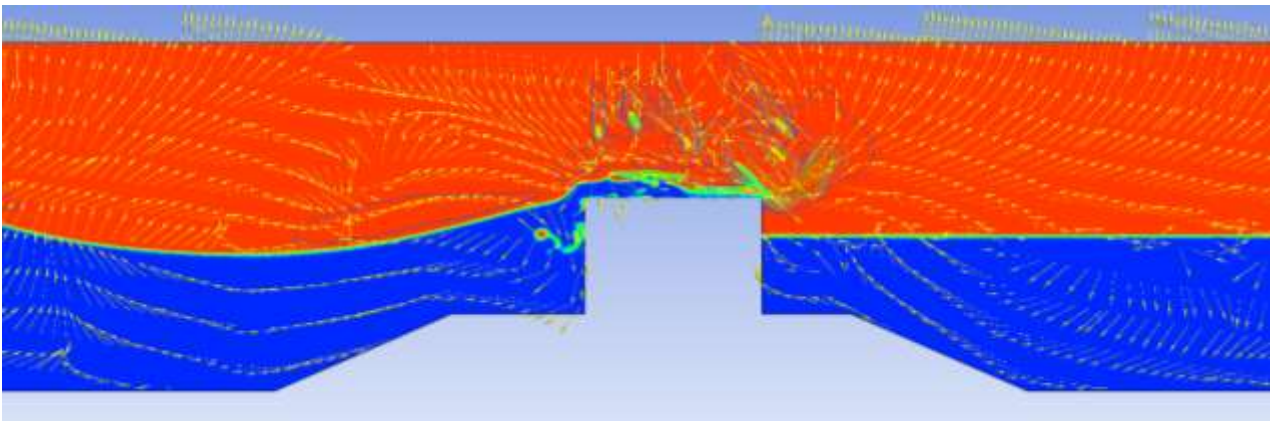


Fig. 8. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 9 seconds from the beginning of the numerical experiment

The results of the calculations at the time of 10 seconds from the start of the numerical experiment are shown in Fig. 9.

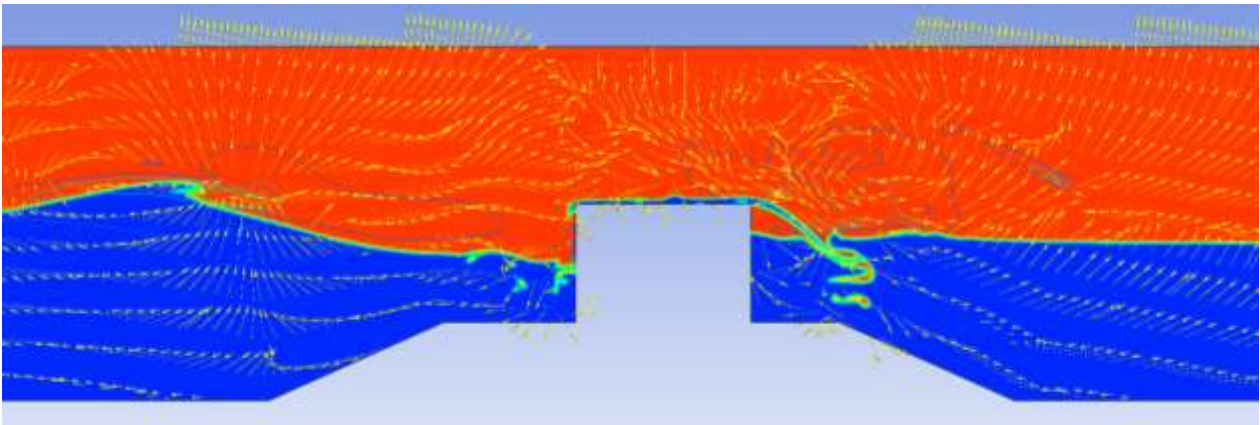


Fig. 9. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 10 seconds from the beginning of the numerical experiment

The results of the calculations at the time of 11 seconds from the start of the numerical experiment are shown in Fig. 10.

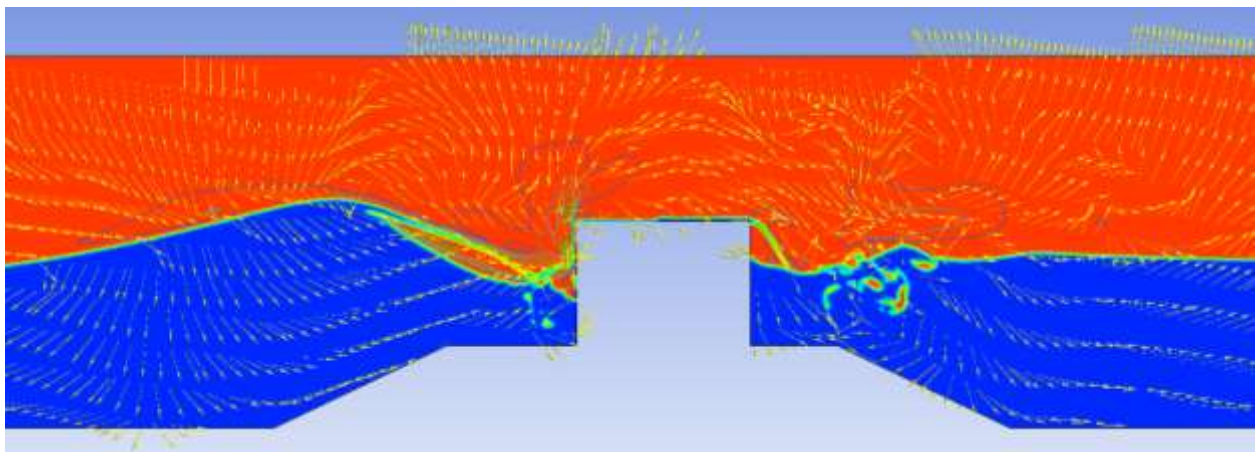


Fig. 10. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 11 seconds from the beginning of the numerical experiment

The results of the calculations at the time of 12 seconds from the start of the numerical experiment are shown in Fig. 11.

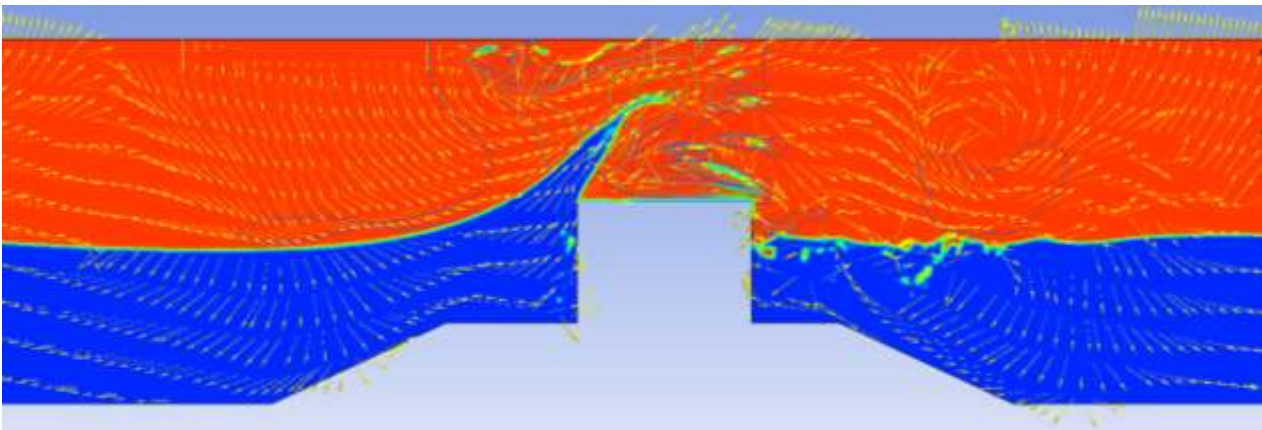


Fig. 11. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 12 seconds from the beginning of the numerical experiment

The results of the calculations at the time of 13 seconds from the start of the numerical experiment are shown in Fig. 12.

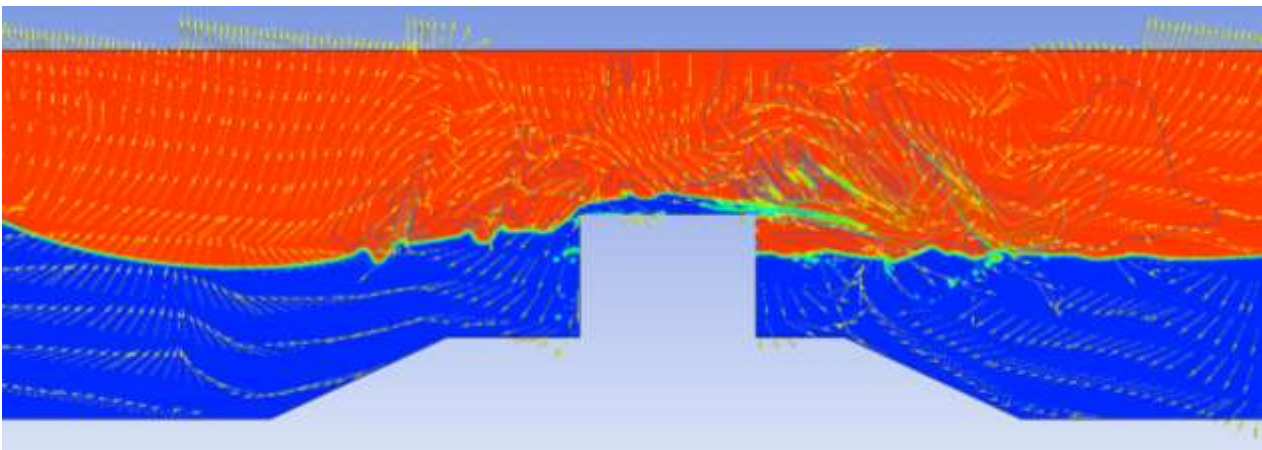


Fig. 12. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 13 seconds from the beginning of the numerical experiment

The results of the calculations at the time of 17 seconds from the start of the numerical experiment are shown in Fig. 13.

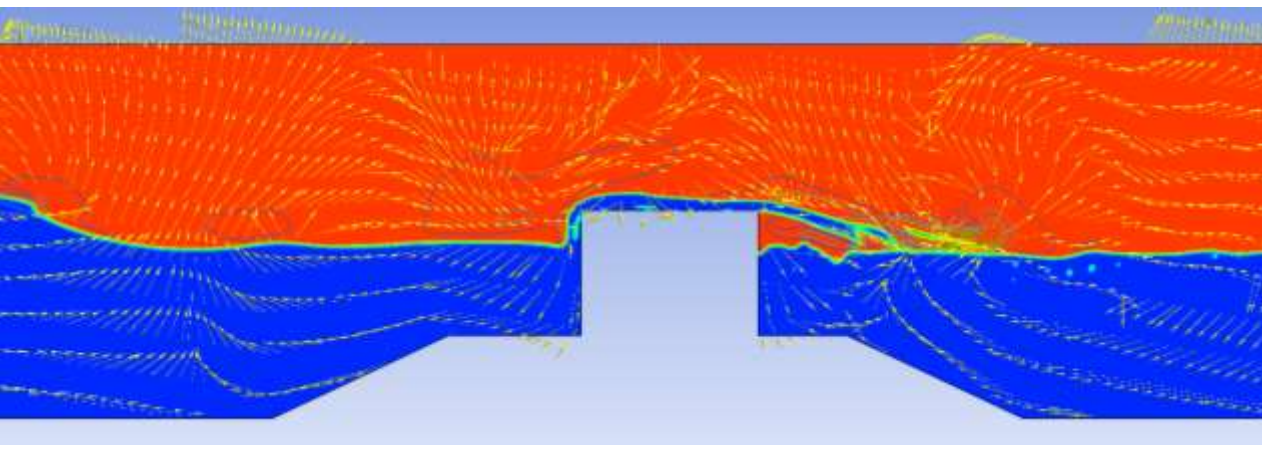


Fig. 13. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 17 seconds from the beginning of the numerical experiment

The results of the calculations at the time of 18 seconds from the start of the numerical experiment are shown in Fig. 14.

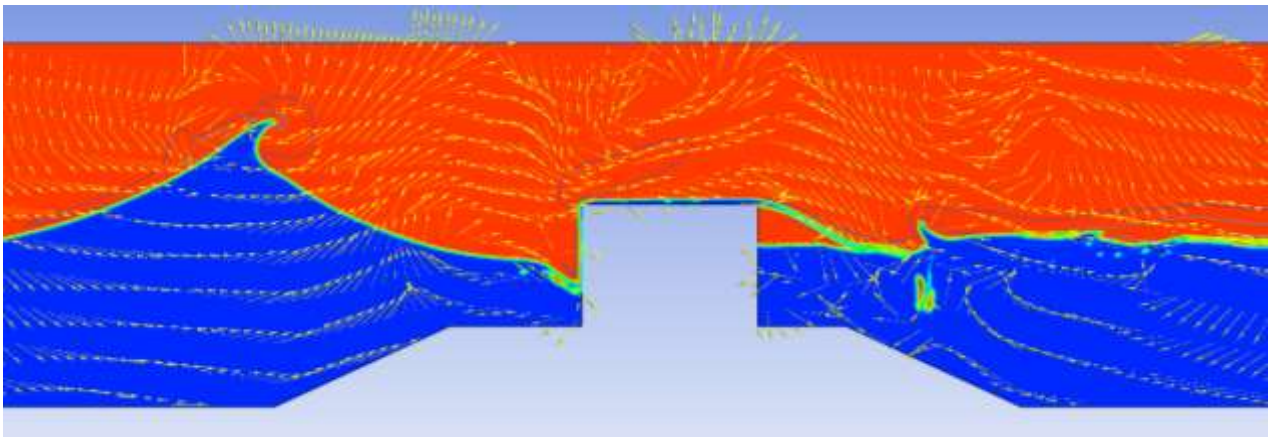


Fig. 14. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 18 seconds from the beginning of the numerical experiment

The results of the calculations at the time of 19 seconds from the start of the numerical experiment are shown in Fig. 15.

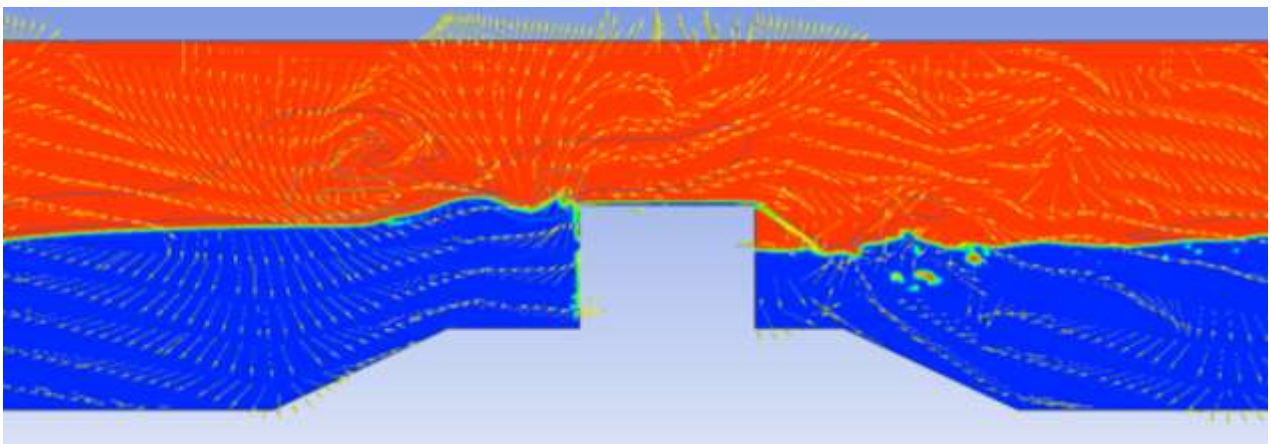


Fig. 15. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 19 seconds from the beginning of the numerical experiment

The results of the calculations at the time of 20 seconds from the start of the numerical experiment are shown in Fig. 16.

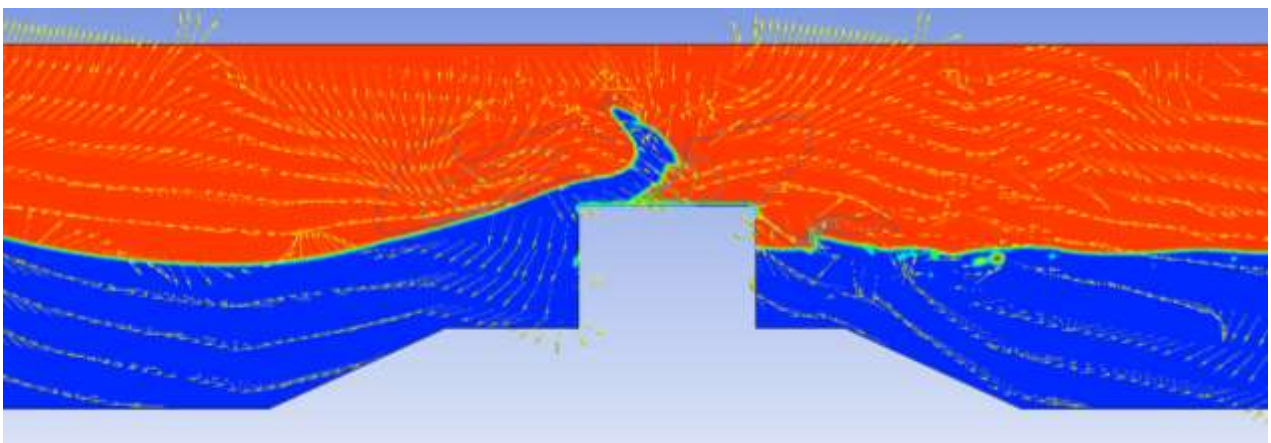


Fig. 16. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 20 seconds from the beginning of the numerical experiment

The results of the calculations at the time of 21 seconds from the start of the numerical experiment are shown in Fig. 17.

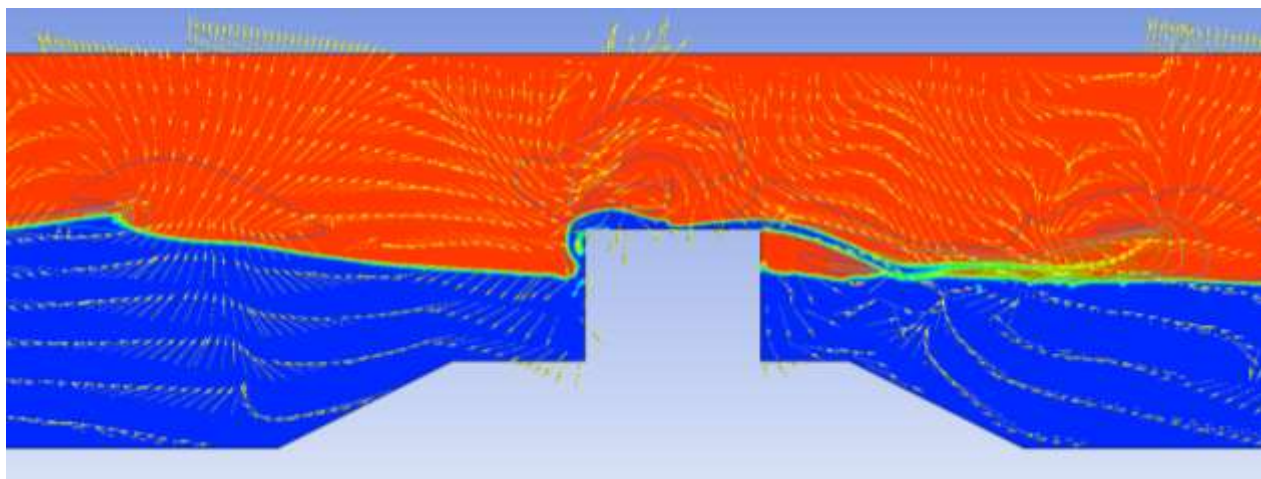


Fig. 17. Vectors of motion of water particles at the moment of time equal to 21 seconds from the beginning of the numerical experiment

In the time interval, starting from 10 seconds from the start of the numerical experiment, the phenomenon of the partial overflow of wave crests through the upper structure of the PHS structure of an incomplete vertical profile onto the protected water area is observed. As a result of the overflow, the formation of transformed waves occurs, which had significantly lower heights.

After that, the process under study is repeated cyclically (Fig. 10-17) until the wave action stops.

**Conclusions.** The results of the numerical simulation presented in the publication confirm the reliability of physical experimental studies presented in publications [1-3]. With the accepted initial data, the difference in the heights of cancelled waves, which were obtained during the numerical simulation and physical experiment, does not exceed – 3.3%.

An analysis of the results of the trajectories of water particles on the presented visualizations, based on the results of numerical simulation, showed that the PHS of an incomplete vertical profile partially reflect waves from their structure in the direction opposite to the movement of the wavefront, the crests of the waves that have not changed the trajectory of the direction of their movement overflow into the protected water area. Waves reflected from the structure move in the opposite direction, interact with suitable waves and partially damp them (Fig. 12-17). With the accepted initial data, the beginning of the interaction of the incident and reflected waves is observed at a distance equal to half the length of the original wave from the PHS of an incomplete vertical profile, the damping process is extended in time when the waves move to the structure and are repeated cyclically.

The initial wave height during the numerical experiment was taken equal to  $\lambda = 24.5$  (m), the elevation of the upper structure of the PHS of an incomplete vertical profile relative to the calm water level will be  $\Delta H = +1.0$  (m), the width of the upper structure of the protective structure  $B = 4.0$  (m), the obtained value of the quenching coefficient was – 0.75, and the transmission coefficient – 0.25, which suggests that the design of the PHS of an incomplete vertical profile under these initial conditions, the kinetic energy of the waves by – 75%, which corresponds to the results of a physical experiment presented in publications [1-3].

The numerical model presented in the publication made it possible to more thoroughly evaluate the pattern of physical processes observed on both sides of the model of PHS structures with an incomplete vertical profile, designed to protect the water area of seaports, as well as elements of the coastal infrastructure of sea cities. The use of this design will reduce financial costs by 10-15% by lowering the elevation of the surface structure.

## References

- [1] R.V. Sinitsa, V.S. Osadchiy, "Opredelenie parametrov gasheniya voln ograditelnumi gidrotechnicheskimi sooruzheniyami nepolnogo vertikalnogo profilya", *Visnik Odes'kuy nacionalnuy morskuy universitet*, no. 2 (51), pp. 108-118, 2017.
- [2] R.V. Sinitsa, V.S. Osadchiy, L.S. Stolyarov, A.V. Chernetskiy, "Analiz suchestvuyushchikh metodik opredeleya parametrov gasheniya voln gidrotechnicheskimi sooruzheniyami nepolnogo vertikalnogo profilya", *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, no. 1(72), pp. 43-56, 2019.
- [3] R.V. Synytsia, "Experimental studies of the influence of waves on the breakwater of a partial vertical profile", *Visnik Odes'koï derzhavnoï akademii budivnictv ta arhitekturi*, no. 80, pp. 93-102, 2020.
- [4] R.V. Sinitsa, V.S. Osadchiy, K.I. Anisimov, S.P. Kolomec, "Ochrona akwenów portów morskich przez konstrukcje falochronu pionowego o niepełnym profilu", *Inżynierii Morskiej i Geotechniki*, no. 3/2020, pp. 114-119, 2020.
- [5] C.W. Hirt, B.D. Nichols, "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", *Journal of computational physics*, vol. 39, pp. 201-226, 1981.
- [6] E. Thompson, "Use of pseudo-concentrations to follow creeping viscous flows during transient analysis", *International Journal for numerical methods in engineering*, vol. 6, pp. 749-761, 1986.
- [7] O.Yu. Birskaia, G.D. Natal'chishin, "Issledovanie vozdeystviya razbivayushchikhsya voln na sooruzheniya nepolnogo vertikal'nogo profilya", *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, no. 6, pp. 45-47, 1982.
- [8] W.N. Seeling, "Two-dimensional Tests of Wave Transmission and Reflection Characteristics of Laboratory Breakwaters", *Tech. Rept. No. 80-1, US Army Coast. Engrg. Res. Ctr.*, Fort Belvoir, VA, 1980.
- [9] N.W.H. Allsop, J.E. McKenna, D. Vicinanza, T.J.T. Whittaker, "New design formulae for wave loadings on vertical breakwaters and seawalls", *Proc 25th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, New York*, pp. 2508-2521, 1996.
- [10] N.W.H. Allsop, D. Vicinanza, M. Calabrese, L. Centurioni, "Breaking Wave Impact Loads on Vertical Faces", *ISOPE International Offshore and Polar Engineering-Conference, Los Angeles, California*, pp. 180-185, 1996.
- [11] N.W.H. Allsop, D. Vicinanza, J.E. McKenna, "Wave forces on vertical and composite breakwaters", *Strategic Research Report SR 443, HR allingford, Wallingford*, pp. 1-94, 1996.
- [12] N. Kobayashi, A. Wurjanto, "Wave Transmission Over Submerged Breakwaters", *Journal of Waterway, Port Coastal and Ocean Engineering*, no. 115, pp. 662-680, 1989.
- [13] T. Sorensen, O.J. Jensen, "Reliability of hydraulic models of rubble-mound breakwaters as proven by prototype measurements", *The dock and harbour authority*, vol. LXV, no. 767, pp. 155-157, 1985.
- [14] A. Koohestani, CRM-Change Management: The Role Of Training In Successful CRM Implementation. Masters thesis, Multimedia University, 2006.
- [15] G. Cuomo, M. Tirindelli, "Wave-in-deck loads on exposed jetties", *Coastal Engineering*, vol. 54, Issues 9, pp. 657-679, 2007.
- [16] K. D'Angremond, J. Van der Meer, R. de Jong, "Wave Transmisin at Lowcrested Structures", *Proceedings of 25th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Kobe, Japan*. 1996.
- [17] R. Briganti, J.W. Van der Meer, M. Buccino, M. Calabrese, Wave transmission behind low crested structures. ASCE, Proc. Coastal Structures, Portland, Oregon, 2003.
- [18] Nauchno-isledovatel'skaya rabota «Raschotnoe obosnovaniye i proektirovaniye konstruktsionnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy dlja zashity ot zatopleniya morskimi volnami territorii zavoda po adrey: Odessa, ul. Chernamorskogo Kazachestva, 72», OGASA, Odessa, 2016.

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГАСІННЯ ХВИЛЬ КОНСТРУКЦІЄЮ  
ОГОРОДЖУВАЛЬНОЮ ГІДРОТЕХНІЧНОЮ СПОРУДОЮ НЕПОВНОГО  
ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ**

<sup>1</sup>**Синиця Р.В.**, к.т.н., доцент,  
sinitsa\_roma@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6796-4785

<sup>1</sup>**Осадчий В.С.**, к.т.н., доцент,  
ovs-55@bk.ru, ORCID: 0000-0002-0611-4944

<sup>1</sup>**Дмитрієв С.В.**, к.т.н., доцент,  
tele@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6396-9060

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

**Анотація.** Стаття присвячена питанням чисельного експериментального дослідження, пов'язаного з визначенням величини гасіння хвиль при переливі їх через верхню будівлю конструкцій огороджувальних гідротехнічних споруд (ОГТС) неповного вертикального профілю. Представлені дослідження були проведені з метою верифікації отриманих результатів фізичних експериментальних досліджень. Фізичні експериментальні дослідження були проведені у гідрохвильовій лабораторії кафедри «Гідротехнічного будівництва» Одеської державної академії будівництва та архітектури. Чисельна модель конструкції ОГТС неповного вертикального профілю була виконана аналогічною умовам натурного майданчика узбережжя Одеського заливу. Конструкцію ОГТС неповного вертикального профілю, передбачувалося розташувати на відстані  $L = 200$  (м) від берегової лінії території, що захищається. У місці розташування огороджувальної споруди, що проектується, розрахункова глибина води  $d = 4,0$  (м). Побудував лучи рефракції та трансформації хвиль при підході хвиль до споруди, що проектується, розрахункова висота хвиль становитиме  $h = 2,4$  (м); середня довжина хвиль  $\lambda = 24,5$  (м); піднесення верхньої будови ОГТС неповного вертикального профілю відносно спокійного рівня води було прийнято рівним  $\Delta H = +1,0$  (м), ширина верхньої будівлі конструкції огороджувальної споруди  $B = 4,0$  (м). У результаті проведення чисельного експерименту, висота, погашеної хвилі, при переливі її через верхню будівлю конструкції ОГТС неповного вертикального профілю на акваторії, що захищається, становила  $h_{tr} = 0,6$  (м). Отриманні результати чисельного моделювання на 3,3% відрізняються від висоти хвилі отриманій при проведенні фізичного експерименту. За результатами проведених експериментальних досліджень була запропонована емпірична залежність, яка може бути використана у інженерній практиці з метою визначення величини гасіння хвиль, при переливі їх через верхню будівлю ОГТС неповного вертикального профілю.

Використання конструкцій ОГТС неповного вертикального профілю, з метою захисту акваторій морських портів, а також елементів берегової інфраструктури морських міст, дозволить підвищити інвестиційну привабливість створення нових проєктів огороджувальних і берегозахисних споруд, завдяки зменшенню позначки надводної частини.

**Ключові слова:** чисельне моделювання, огороджувальна гідротехнічна споруда неповного вертикального профілю, гасіння хвиль.

Стаття надійшла до редакції 13.01.2023

**IMPROVING THE PERFORMANCE OF BOILER PLANTS  
DUE TO THE USE OF DIRECT AND REVERSE RANKIN CYCLES**

<sup>1</sup>**Arsirii V.A.**, Doctor of Sci., Professor,  
vasyly.arsirii@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3617-8487  
<sup>1</sup>**Ryabokon P.M.**, postgraduate student,  
petr070567@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3006-8757  
<sup>1</sup>*Odessa State Academy of Construction and Architecture*  
4, Didrikson str., Odessa, 65029, Ukraine

**Abstract.** To generate electricity from biofuels at heat and power enterprises of Ukraine, the direct Rankine cycle is used, which ensures the efficiency of energy transformation within  $\eta = 0.25-0.55$ . To improve the efficiency of fuel energy, use in boiler plants, it is also proposed to implement a reverse Rankine cycle scheme. Such a proposal is good to use in enterprises where there is a need for drying biomaterials. Instead of a separate boiler for drying processes, it is proposed to use the energy of water condensation from flue gases. In this case, the cost of electricity for the operation of the compressor is significantly less than the amount of heat obtained by condensing water from flue gases. The efficiency coefficient or COP of the reverse Rankine cycle can have values greater than one  $\eta = \text{COP} > 3$ . The combination of direct and reverse Rankine cycles in the technological scheme of the boiler plant increases the efficiency of using primary energy sources.

The paper analyzes the representation of energy as a combination of two components: the potential  $P$  and the dynamics  $D$ . The Leibniz model, in which the power  $N$  is represented as the product of the potential  $P$  and the dynamics  $D$  with the unification of the unit of measure Watt, allows calculating the efficiency of transformation processes of different types of energy. To improve the energy performance of boiler plants, further development of the Newton model is proposed, which makes it possible to calculate the process dynamism indicator –  $\mu$ . In Newton's model, within the framework of one type of energy, the dynamism indicator is calculated – as the ratio of dynamics to the initial potential  $\mu = D/P$ . Dynamism  $\square$  can be calculated as the reciprocal of the resistance  $R$ , provided that the units of measurement of the energy components – potential and dynamics are unified. To increase the efficiency of biofuel combustion energy use, the idea of the reverse Rankine cycle has been implemented. The moisture condensation temperature of the flue gases increases due to an increase in the pressure of the medium. To do this, the smoke exhauster is moved from the discharge zone to the pressure zone. The additional energy from the flue gases of the boilers can be used to increase the efficiency of drying biomaterials. It is possible to refuse an additional boiler for drying materials, which significantly reduces fuel costs, and also improves the environmental performance of technological processes.

**Key words:** energy, Rankine cycle, efficiency, biomass, drying.

**Introduction.** Heat supply systems of Ukrainian cities are combined into large energy complexes – district heating systems (DH). For the past few decades, DH systems have been operating stably, so only routine measures have been taken. Several pressing issues can be identified. First of all, this is the physical and moral aging of power equipment, as well as a decrease in efficiency and other indicators of energy excellence.

**Analysis of recent research.** The Millennium Declaration on sustainable development noted the requirement to double the global rate of increase in efficiency by 2030 [1, 2]. Energy contributes about 60% of total global greenhouse gas emissions. Therefore, in order to improve the environmental situation, the use of biomass as a remnant of the processing of agricultural products as fuel is encouraged. Biofuel contains less ash and provides a significant improvement in the

environmental performance of power equipment [3]. A positive factor is the development of various kinds of models aimed at improving the energy performance of both the main and auxiliary equipment [4, 5]. Modeling of energy processes makes it possible to predict and analyze economic, environmental and other performance indicators of various technologies [6-8].

An analysis of trends in the development of world energy has shown that the main thing is to extend the life of energy enterprises and equipment by improving performance [9]. First of all, this is the development and improvement of the performance of the joint generation of heat and electricity at urban CHPPs with steam boilers, as well as the transfer of heating boiler plants to the steam mode of cogeneration of electricity and heat. In addition, steam boiler plants of type D, E, K, etc., which are many in the processing industry, can be transferred to cogeneration mode with the combustion of biofuels (sunflower husks, miscanthus, energy willow) and other energy fuels in Ukraine (Table 1).

Table 1 – Characteristics of different types of fuel

Characteristics	Units Measurements	Sunflower husk	Miscanthus	Stone charcoal	Wood
Calorific value	MJ/kg	19-20	18.9	18-23	18-19.5
Ash content	%	2.7-4.5	4.88	20	0.5-1.5
Humidity	%	6-8	10	5-6	7-8
Sulfur	%	0.23-0.45	0	5-5	0

The selected set of problems involves the development of goals and objectives aimed at improving the performance of the energy industry, especially for the rational and sustainable development of cities.

**The Purpose of research.** Analysis of the problems of development of heat supply systems for settlements, development of measures to improve the quality indicators of the operation of the main and auxiliary equipment, the use of energy fuels with improved characteristics.

To solve the problem, the research **tasks** are defined:

- analysis of indicators of perfection of energy processes to increase the capacity of equipment and systems;
- development of indicators characterizing the dynamic processes of hydro and aero systems;
- search for effective methods of using energy fuel and new technologies that improve the performance of its use.

**Materials and research methodology.** Two options for organizing energy processes – direct and reverse Rankine cycles – were used in the research. Features of the organization of the reverse cycle significantly increase the energy value of low-potential flue gases due to an increase in pressure and, as a result, an increase in the temperature of the phase transition – moisture condensation. When designing the channels of the recuperators, indicators of energy perfection were used. In addition to the well-known indicators of the efficiency of transformation of different types of energy, an indicator of the dynamism of the implementation of potentials into work is proposed.

**Research results.** Indicators of the perfection of energy processes are used in solving problems of increasing the power of equipment and systems. First of all, it is necessary to analyze the concept of energy  $E$ , which can be attributed to different types of manifestation (electricity, heat, aero and hydro dynamics ...). Dynamics is inherent in energy – movement, as well as transformation from one type to another. In engineering, energy is most often associated with work  $A$ . The unit of measure for work is Joule [J], which is calculated as the product of force  $F$  or weight  $G$  and the travel path  $l$ .

$$E \equiv A = F \times l = G \times l, \quad [n] \times [m] = [J]. \quad (1)$$

An important indicator of energy is power, which characterizes the intensity of work. The formulas for calculating the power  $N$  are similar in different manifestations of energy [10]. Aristotle proposed the concept of energy as a combination of two components: potential  $P$  and dynamics  $D$  [11], but the parameters are formed into groups according to different measurable indicators:

Hydraulic energy  $N_{hy} = \rho g Q H,$  [W]; (2)

Electric energy  $N_{el} = U \times I,$  [W]; (3)

Thermal energy  $N_t = c \Delta T M = \Delta i \times M,$  [Bт]. (4)

In hydraulics, parameter groups are formed based on the flow rate:

$Q$  [ $m^3/s$ ] – volumetric;  $\rho Q$  [ $kg/s$ ] – mass;  $\rho g Q$  [ $n/s$ ] – weight flow rate.

In electricity, the power formula can be unambiguously divided into two components: voltage  $U$  – potential and current strength  $I$  – dynamics. In thermal energy, the potential is represented by enthalpy  $i$ , however, when calculating heat transfer processes or heat dynamics, the potential should be the temperature  $T$ , since the movement or dynamics of heat goes from a high temperature to a lower one. It is more logical to combine heat capacity  $c$  with mass to represent the amount of heat in the considered body mass  $M$ , but such a statement requires investigation. Most importantly, power is the only indicator for which the unit of measurement [W] is unified, which makes it possible to determine the efficiency of transformation of different types of energy.

$$\text{Efficiency}_{\text{pump}} \equiv \eta_{\text{pump}} = N_{hy} / N_{el}, \quad [W]/[W]. \quad (5)$$

The energy that we expend in the pumping unit is converted into useful work for lifting and moving water. A few decades ago, power could be represented in [hp], that is, one horsepower is equivalent to  $1 \text{ h.p.} = 785 \text{ W}$ .

Newton formulated a model for the correspondence of dynamic processes to the initial potential  $D \equiv P$ , taking into account the resistances in the system  $R$ .

Hydraulic energy  $Q \equiv H^{0.5} / (R_{hy} + \alpha)^{0.5};$  (6)

Electric energy  $I = U / R_{el};$  (7)

Thermal energy  $q \equiv \Delta T / R_t.$  (8)

But, only for electricity, the formula uses the equal sign, where the current strength  $I$  and potential  $U$  are linearly correlated using the proportionality coefficient or resistance  $R$ . The value of the above formulas would be significantly higher if, within the unified power indicator, the dynamics and potential indicators were unified [12]. You can enter a normalized indicator of process dynamism.

$$\mu_{el} = D / P = I / R \quad \text{– for electricity;} \quad (9)$$

$$\mu_{hydr} = D / P = I / (R + \alpha) \quad \text{– for hydrodynamics.} \quad (10)$$

Leibniz formulated the concept of power  $N = P \times D$  as the product of the potential  $P$  and the dynamics of  $D$ . Due to the unification of the units of power in  $W$ , the transformation coefficient of different types of energy is presented in a normalized form  $0 < \eta < 1$ . The Leibniz power model is good to use optimization of processes in order to ensure minimum costs. Thus, the values  $\eta > 0.8$  have already been reached in pumps, fans or smoke exhausters. Technologies for generating electricity at thermal and nuclear power plants, which theoretically represent the direct Rankine cycle, have an efficiency range of  $\eta = 0.25-0.45$ .

Recently, heat generation technologies based on the reverse Rankine cycle have become widespread. Such technologies use phase transition processes, when the working fluid in the rarefaction zone changes from a liquid state to a gaseous state with the absorption of a large amount of energy at a lower temperature – cooling and vice versa, condensation in a high pressure zone releases a comparable amount of heat when the gas turns into a liquid.

Under favorable conditions (when the value of the compressor capacity and a small increase in the switching efficiency increase temperature), the efficiency coefficient COP is observed as the use of the energy of the consumed energy to the heat received from the flue gas water condensation can be greater than the consumption of  $\text{COP} > 5$ . The technology can be designated as a system with the definition of energy balance, since for 1 kW of energy expended, more than 5 kW is

generated at a higher temperature than at the source. This performance is called a pump, since energy is used from a cold environment to a warmer one. On Fig. 1 shows a diagram and graphs of the processes of the reverse Rankine cycle in a heat pump.

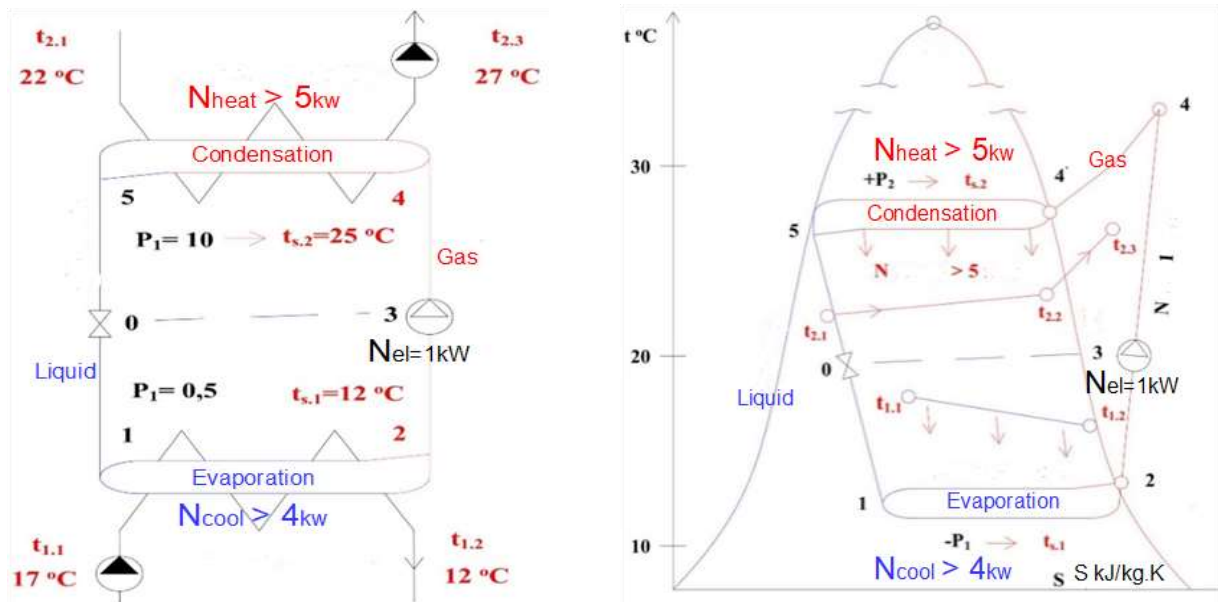


Fig. 1. Representation of reverse Rankine cycle processes:  
a – scheme of heat pump processes; b – parameters of the heat pump

The main function of the processes of the reverse Rankine cycle is the extraction of energy from low potential sources (with a low temperature) and the transfer of this energy to a medium with a high potential (with a higher temperature). The conditional axis of separation of parameters in the system can be considered the line 0-3 between the regulator and the compressor. Under natural conditions, the liquid phase of the coolant medium is always at the bottom, and the gaseous phase is located above the liquids. The heat pump circuit can be divided into two parts.

Point 0 indicates the regulator. The parameters behind the regulator can be considered the beginning of the cycle. Section 1-2 is responsible for the transfer of energy from a conditionally cold source – the external environment to the evaporator, in which a phase transition from a liquid to a gaseous state occurs. The cooling power  $N_{\text{cold}}$  is significantly greater than the electric power  $N_{\text{el}}$  spent on the compressor. COP in the cooling zone could be Section 4-5 is responsible for the transfer of energy from the capacitor of a conditionally hot source to the external environment. The capacitor undergoes a phase transition from the gaseous state to the liquid phase. Thus, the condenser heats the environment, and the heating power  $N_{\text{heat}}$  can be significantly greater than the electric power  $N_{\text{el}}$  spent on the compressor.

COP is the coefficient of transformation of different types of energy: electricity  $N_{\text{el}}$  is consumed, and thermal power  $N_{\text{heat}}$  is useful. In a normalized form, with a small temperature difference, the energy transformation efficiency can be greater than unity  $\eta > 1$ . The law of conservation of energy is not violated, since in the technological cycle how much energy is extracted in the lower part, the same amount of energy (but taking into account dissipation) is given off in the upper part. The electrical energy in the heat pump is spent on the formation of pressure and vacuum, as well as on transport with its own values of losses and, accordingly, efficiency. And heat and cold are obtained by organizing natural processes in accordance with their separate balance ratios, which are balanced taking into account dissipation and have their own efficiency values. Rankine's ideas, implemented in the form of cyclic processes, can also be organized in technologies that require heating with a large amount of energy for drying biomaterials: soybeans, wheat, etc.

To increase the efficiency of such processes, it is necessary to distinguish between changes in parameters within one type of energy [12]:

1 – Change in temperature (potential). To heat 1 kg of water by  $100^{\circ}\text{C}$ , it is necessary to spend 400 kJ of energy.

2 – The change in thermal energy during a phase transition occurs at a constant temperature, but has a much larger range of energy changes. When converting 1 kg of steam into water, 2000 kJ can be obtained at a constant temperature  $t_s = 100^{\circ}\text{C}$ . Therefore, if you need to heat any medium, it is better to do it due to the energy of the phase transition and better due to the condensation of the vapor part of the flue gases. On Fig. 2 shows a diagram of power equipment, including a boiler for generating saturated steam and a drying plant with auxiliary equipment.

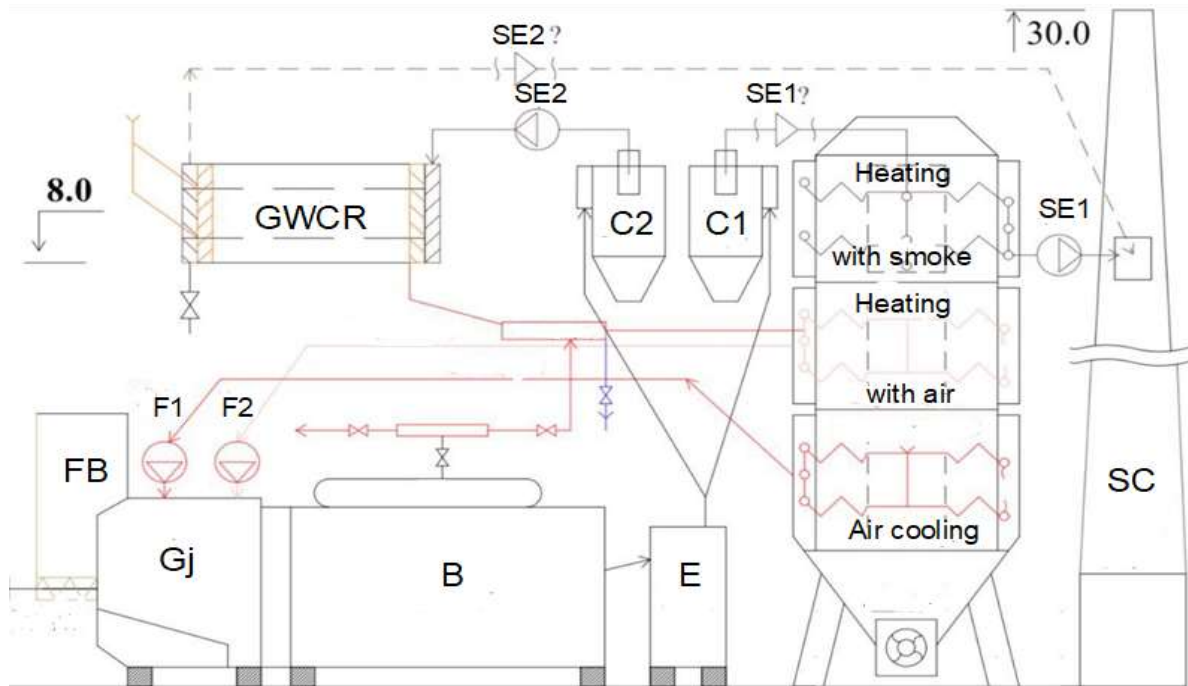


Fig. 2. Scheme of power equipment of the system for drying biomaterials:  
 FB – fuel box; Gj – gas-jet; B – Boiler; E – economizer; C – cyclone; GWCR – flue gas water condensation recuperates; Fan; SE – smoke exhauster; SC – smoke chimney

To organize the process of drying or removing moisture from biomaterials, dry heated air or flue gases are used. To heat the air, you can use electricity, the energy of burning fuel. However, a more economical option for air heating can be considered the energy of flue gases after boilers, the temperature of which is often more than  $150^{\circ}\text{C}$ . As an innovative increase in the temperature of water vapor condensation, it is proposed to use a flue gas water condensation recuperate GWCR – a flue gas air heater.

In the first part of the dryer, preheating of soybeans is formed with the transfer of part of the moisture from soybeans to flue gases. To organize the soybean heating process, it is necessary to transfer energy from the flue gases without condensation, since condensation will lead to the transfer of a large amount of water to the soybean, which is contrary to the task of drying. To eliminate condensation, it is advisable to place the smoke exhauster *DI* between the dryer and the chimney to form a vacuum in the first part of the dryer. The temperature of the phase transition of water in the flue gases is reduced, which eliminates the occurrence of moisture condensation in the flue gases.

In the second part of the dryer, the task is to transfer more heat to dry air. Analysis of parameter changes in Fig. 3 shows that an obstacle to the transfer of energy of the phase transition is an insufficient potential – the temperature of the phase transition. Therefore, for the second part of the dryer, it is necessary to solve the problem of improving the parameters of the recuperator based on optimizing the value of the potential – pressure [13]. The problem of increasing the moisture condensation temperature of flue gases can be solved by changing the installation location

of the smoke exhauster  $D2$  in order to organize pressure in the heat exchanger in the flue gas channels.

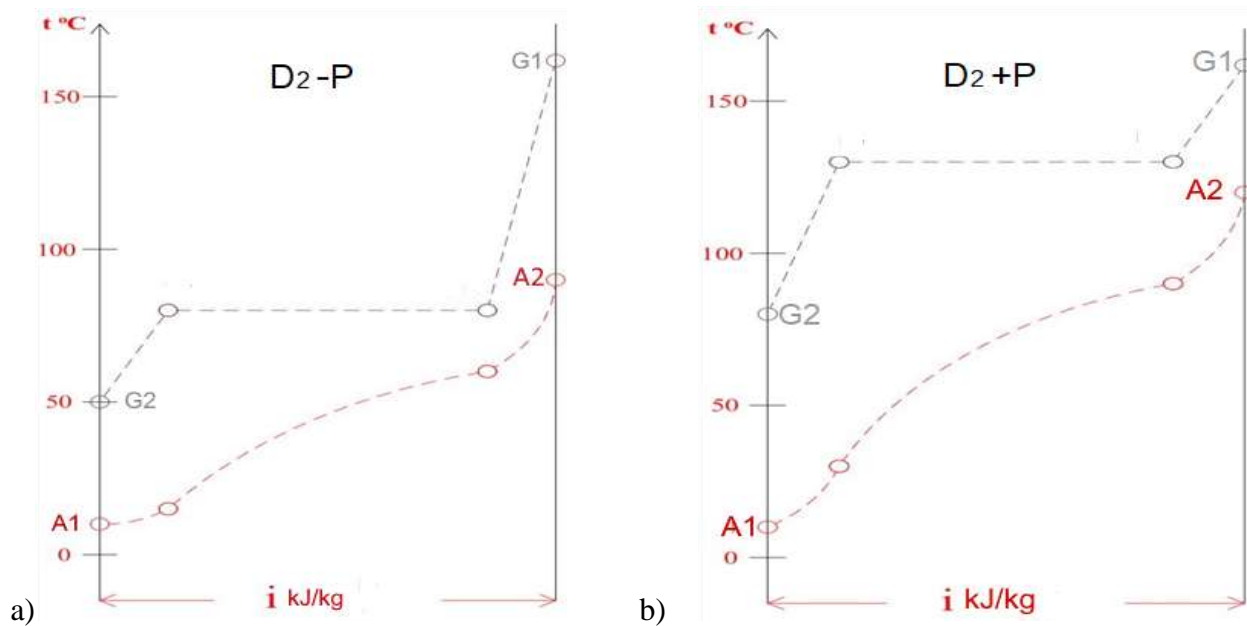


Fig. 3. Heat exchange in the heat exchanger at different potentials in the gas channels:  
 a – rarefaction in gas channels; b – pressure in gas channels

The most economical and environmentally friendly stage of soybean dehydration is cooling in the third section. In the cooling zone, an important parameter is the degree of air dryness  $d_{\text{airB1}} = 5\text{gr/kg.d.m.}$  If the smoke exhauster  $D2$  is installed after the heat exchanger, and in the flue gas channels, the discharge of moisture condensation occurs at a constant temperature  $t_{s,D2-} = 85^{\circ}\text{C} = \text{const.}$  The amount of flue gas heat transferred to air heating during condensation will be 5 times greater than when the flue gas temperature decreases.

To improve the efficiency of the drying process of biomaterials, it is proposed to increase the temperature of condensation of moisture from flue gases by increasing the pressure in the flue gas channels and, accordingly, increasing the temperature at which condensation will take place [8, 9]. This solution corresponds to Rankine's idea in the zone of pressure increase in the system by the compressor. To do this, as an innovative solution, it is proposed to install a  $D2$  smoke exhauster in front of the heat exchanger, that is, switch it to the fan or compressor mode (Fig. 1 and Fig. 2). Changing the potential – pressure in the flue gas channels from discharge to pressure will increase the condensation temperature to  $t_{s,D2+} = 130^{\circ}\text{C}$  and higher. To implement such a solution, the  $D2$  smoke exhauster moves from the zone after the GWCR recuperator to the zone after the Ts2 cyclone, switches to the compressor mode to create the required vacuum.

However, the increase in pressure that the compressor generates can significantly increase the cost of electrical energy for the drive. Therefore, an alternative to increasing the air temperature by increasing the compressor speed can be considered the use of a heater. The heater solves the problem of increasing the air temperature by using steam from the boiler. The heater uses saturated steam, which also condenses at a constant phase transition temperature  $t_{s,\text{Steam}} = 180^{\circ}\text{C}$ . Thus, the paper formulated the problem of optimizing the parameters of the joint operation of the recuperate and heater. Today, the balance of fuel costs for the operation of a dryer with a supply of 20 tons of soybeans per hour is more than  $V_u = 500\text{kg.c.t./hour}$ . The innovative method of drying soybeans using flue gas heat recovery for air heating provides fuel costs by more than 50%. The energy costs for the operation of fans and smoke exhausters are not considered, since the costs for the operation of blowers remain comparable.

**Conclusions.** The possibility of increasing the temperature of the reverse phase transition within the framework of the use of the Rankine cycle makes it possible to obtain significant savings

in resources in the system for drying biomaterials due to insignificant energy costs for the compressor, which increases the pressure in the flue gas channels of the recuperator. To implement this idea, the smoke exhauster operating in the boiler plant is switched to the compressor mode (the flue gas channels in the heat exchanger will be under pressure). With a new installation of a smoke exhauster-compressor with pressure in the recuperator, air heating will not exceed  $t_{\text{air} + \text{P}} > 120^{\circ}\text{C}$  due to an increase in the temperature of the phase  $t_{\text{SSG} + \text{P}} > 130^{\circ}\text{C}$ .

To analyze the perfection of energy processes, it is proposed, in addition to the indicator of the conversion efficiency of different types of energy, to apply the indicator of dynamism – as the ratio of the dynamic component of energy to the initial potential. Such a variant of an innovative solution can be qualified as an architecture of energy potentials of various kinds of technological processes.

### References

- [1] Report by the Director-General on the execution of the programme adopted by the General Conference. UNESCO 2001 [Online]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000123381>
- [2] Direktiva evropejs'kogo parlamentu i radi 2012/27/ES vid 25 zhovtnya 2012 pro energoefektivnist'. [Online]. Available: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_017-12#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_017-12#Text)
- [3] A.V. Efymov, S.L. Zevyn, "Metod postroeniya diagnosticheskikh modelej oborudovaniya energoustanovok", *Vesnik NTU «HPI»*, vol. 13, pp. 153-157, 2002.
- [4] V.A. Maliarenko, I. O. Shcherbak, "Analiz spozhivannya palivno-energetichnih resursiv Ukraïni ta ïh raccional'nogo vikoristannya", *Visnik nacional'nogo tekhnichnogo universitetu «HPI»*, *Energetichni ta teplotekhnichni procesi j ustatkuvannya*, no. 14, pp. 118-127, 2013.
- [5] *Razrabotka i sovershenstvovanie metodov i sredstv povysheniya energoeffektivnosti dejstvuyushchih i perspektivnyh teplovykh turbostanovok i ih kompleksov*. H.: IPMash NAN Ukrainy, 2012.
- [6] A.A. Khalatov, "Enerhetyka Ukrainy: suchasnyi stan i naiblyzhchi perspektyvy", *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, no. 6, pp. 53-61, 2016.
- [7] H.Y. Efymochkyn, B.Y. Shmukler, H.D. Avrutskyi, "Sovershenstvovanye teplovykh skhem enerhoblokov", *Teploenerhetyka*, no. 4, pp. 48-53, 2000.
- [8] M. Melnychuk, V. Dubrovyn, "Zelenaya energiya v Ukraine", *Ahrosektor*, no. 2, pp. 12-13, 2007.
- [9] H.H. Heletukha, T.A. Zheleznaia, A.V. Tryboi, *Perspektivy vyrashchivaniya i ispol'zovaniya energeticheskikh kul'tur v Ukraine. Analiticheskaya zapiska BAU №10*, 2014. [Online]. Available: <https://uabio.org/activity/1143/>
- [10] A.P. Skrypnyk, "Kakye ontologicheskiye osnovaniya raskryvaet arystotelevskaia etyka? Etycheskaia mysl", *Ethical Thought*, 18, pp. 84-89, 2019.
- [11] H.A. Fyllypov, L.Э. Melamed, A.Y. Tropkina, "Ierarhiya modelej analiza kollektornykh sistem i makromasshtabnyj analiz", *Izv. vuzov. Problemy energetiki*, no. 5, pp. 316-325, 2010.
- [12] V. Arsiri, O. Kravchenko, "Reconstruction of turbomachines on the basis of the flow structure visual diagnostics", *International Journal Mechanics and Mechanical Engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 405-414, 2018.
- [13] V.A. Arsyryi, O. Kravchenko, Yu. Serbova, P. Riabokon, A. Kroshka, "P'ezo model' rascheta i predstavleniya energeticheskikh harakteristik aerodinamicheskikh sistem", *International journal Sustainable development*, vol. VII, pp. 52–59, 2/2020.

**ПОЛІПШЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ПРЯМОГО І ЗВОРТНОГО ЦИКЛІВ РЕНКІНА**

<sup>1</sup>Арсирій В.А., д.т.н., професор,  
vasyly.arsiriy@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3617-8487

<sup>1</sup>Рябокоть П.М., аспірант,  
petr070567@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3006-8757  
<sup>1</sup>Одеська державна академія будівництва і архітектури  
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

**Анотація.** Для створення електроенергії з біопалива на теплоенергетичних підприємствах України використовується прямий цикл Ренкіна, який забезпечує ефективність трансформації енергії в межах  $\eta = 0,25 - 0,55$ . Для підвищення ефективності використання енергії палива в котельних установках запропоновано реалізувати схему зворотного циклу Ренкіна. Таку пропозицію добре використати на підприємствах, де є потреба в осушенні біоматеріалів. Замість окремого котла для осушення пропонується використовувати енергію конденсації води з димових газів. В цьому випадку витрати електрики на роботу компресора істотно менші за кількість тепла, отриманого при конденсації води з димових газів. Коефіцієнт ефективності або  $COP$  зворотного циклу Ренкіна може мати значення більше одиниці  $\eta = COP > 3$ . Поєднання в технологічній схемі котельної установки прямого та зворотного циклів Ренкіна збільшує ефективність використання первинних джерел енергії.

У роботі виконано аналіз уявлення енергії як поєднання двох компонент: потенціалу  $P$  і динаміки  $D$ . Модель Лейбніца, у якій потужність  $N$  представляють, як добуток потенціалу  $P$  на динаміку  $D$  з уніфікацією одиниці виміру Ватт, дозволяє розраховувати ефективність процесів трансформації різних видів енергії. Для покращення енергетичних показників котелень запропоновано подальший розвиток моделі Ньютона, що дозволяє розраховувати показник динамізм процесів  $\mu$ . У моделі Ньютона в рамках одного виду енергії розраховується показник динамізму – як відношення динаміки до вихідного потенціалу  $\mu = D/P$ . Динамізм можна розраховувати як зворотну величину опорів  $R$  за умови уніфікації одиниць вимірювання компонентів енергії – потенціалу та динаміки.

Показано приклад успішного використання біомаси як основне паливо котельних установок, оскільки містить менше золи. Використання ідеї зворотного циклу Ренкіна про підвищення температури конденсації вологи димових газів за рахунок підвищення тиску середовища забезпечує підвищення системної ефективності процесів. Найкраще використання енергії димових газів котлів підвищує ефективність осушення біоматеріалів, суттєво зменшує витрати енергії, покращує екологічні показники роботи технологічних процесів.

**Ключові слова:** енергія, цикл Ренкіна, ефективність, біоматеріали, осушення.

Стаття надійшла до редакції 7.03.2023

**СТІЙКІСТЬ ГРУНТОВИХ СПОРУД  
З УРАХУВАННЯМ ПРОСТОРОВОГО ЕФЕКТУ**

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

<sup>1</sup>Дмитрієв С.В., к.т.н., доцент,  
tele@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6523-5464

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

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

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

**Анотація.** Проблеми стійкості ґрунтових споруд і розвиток зсувних процесів, в тому числі Чорноморського узбережжя, проявляють істотну небезпеку для населення та існуючих будівель і споруд. Освоєння зсувних і зсувонебезпечних схилів вимагає пильного і детального вивчення, результати якого повинні стати основою реалізації заходів щодо інженерного захисту територій, враховуватися при проектуванні і будівництві нових об'єктів. При розрахунках стійкості схилів та укосів ґрунтових споруд відзначається відмінність в розрахункових значеннях коефіцієнтів запасу стійкості в двовимірній і тривимірній постановках задач. Аналіз проведених досліджень вказує на необхідність врахування впливу топографічних умов укосів та схилів при їх розрахунку за двовимірними схемами в межах призначених створів.

Визначення коефіцієнта запасу стійкості може здійснюватися як аналітичними, так і графоаналітичними методами. У більшості випадків розрахунок стійкості схилів і укосів і визначення коефіцієнта запасу стійкості проводиться для двовимірних перетинів, побудованих по лініях, що збігаються з найбільш імовірним напрямком зсуву зсувного тіла.

Найбільш поширені методи, які застосовуються в розрахунках стійкості укосів у двовимірній постановці завдання, є самими використовуваними через їхню простоту, проте ці методи засновані на прийнятті деяких припущень, описаних вище. На основі аналізу ряду робіт по двовимірному і тривимірному моделюванню ґрунтових укосів показано, що оцінка стійкості укосів та зсувних схилів є складним, відповідальним і маловивченим завданням.

Виконання розрахунків ґрунтових укосів в тривимірній постановці завдання дає 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 укосу або схилу. Тривимірне моделювання ґрунтових укосів також дозволяє враховувати фактори, що оказують істотний вплив на стійкість, які не можна врахувати при двовимірному моделюванні (особливості топографії, наявність підрізування укосів або схилів, ярів, точкових будівельних конструкцій тощо).

**Ключові слова:** ґрунтова споруда, коефіцієнт запасу стійкості, штучний насип, зсувний схил, ґрунтовий укіс, стійкість, форми рельєфу, метод розрахунку, тривимірна схема, двовимірна схема.

**Вступ.** Завдання забезпечення стійкості ґрунтових споруд виникає при проектуванні споруд гідротехнічного, промислового, цивільного, транспортного та інших призначень. Внаслідок освоєння територій, які раніше вважалися небезпечними і не призначеними для

будівництва, все частіше доводиться зводити будівлі і споруди на ґрунтових укосах і нестійких схилах. При цьому потрібно вирішувати питання не тільки забезпечення їхньої стійкості, а й захисту навколишнього середовища.

У зв'язку з цим питання досягнення економічно обґрунтованого використання території під проектування і будівництво на нестійких схилах в даний час набуває актуального характеру. Для проектних і будівельно-монтажних організацій, які зводять спеціальні будівлі та споруди на зсувонебезпечних територіях, питання достовірної оцінки ступеня стійкості схилу є особливо важливим. Однак чітких рекомендацій про те, якими методами слід оцінювати величину ступеня стійкості укосу, на якому планується вестися будівництво, а також які способи застосовувати для визначення тиску на протизсувну споруду, в даний час в нормативній літературі не відзначається. Розкидані по великій кількості літературних джерел методи розрахунку нерідко вельми суперечливі і важко їх застосувати для практичних обчислень.

**Аналіз останніх досліджень.** Проблеми стійкості ґрунтових укосів і розвиток зсувних процесів, в тому числі Чорноморського узбережжя, являє істотну небезпеку для населення та існуючих будівель і споруд. Освоєння зсувних і зсувонебезпечних схилів вимагає пильного і детального вивчення, результати якого повинні стати основою реалізації заходів щодо інженерного захисту територій, враховуватися при проектуванні і будівництві нових об'єктів. При розрахунках стійкості ґрунтових укосів відзначається відмінність в розрахункових значеннях коефіцієнтів стійкості в двовимірній і тривимірній постановках. Аналіз проведених досліджень вказує на необхідність врахування впливу топографічних умов всього укосу при його розрахунку за двовимірними схемами в межах призначених створів.

На сьогоднішній день в нормативній літературі з'являються вимоги для розрахунку стійкості укосів, в певних умовах, в тривимірній постановці. Так, згідно вимогам ДБН В.1.1-12:2014 «Будівництво в сейсмічних районах України» [1], перевірка стійкості може бути виконана за допомогою спрощених методів (метод граничної рівноваги), коли топографія поверхні і стратиграфія ґрунтів не дають дуже різких порушень. Вказується, що аналіз методів розрахунку стійкості укосу в тривимірній постановці більш застосовний для укосів зі складною геоморфологією, різним просторовим розподілом міцності і деформаційних характеристик ґрунтів і різнорідними гідрогеологічними умовами.

Згідно ДБН В.2.4-20:2014 «Греблі з ґрунтових матеріалів. Основні положення» (Проект, остаточна редакція) [2], при розрахунках гребель у вузькому каньйоні, на ділянках з низькими характеристиками міцності рекомендується оцінювати стійкість укосів з урахуванням їхньої просторової роботи.

У вимогах ДБН В.1.1-46:2017 «Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів і обвалів. Основні положення» [3] зазначено, що розрахунки обвальних процесів слід виконувати на математичних моделях, що враховують просторовість цих процесів. Розрахунки стійкості в тривимірній постановці слід здійснювати, як правило, в складних інженерно-геологічних умовах при високому ступені їхньої вивченості, достовірному визначенні положення поверхні ковзання. Методи оцінки стійкості укосів і схилів, засновані на теорії граничної рівноваги, розглядають тільки напружений стан ґрунтового масиву в граничній рівновазі, деформації ґрунтів укосу при цьому не враховуються [3].

Вплив форми укосу в плані і профілі на розвиток зсувних явищ чітко простежується в покривних відкладеннях. Найчастіше зсуви виникають на опуклих і опукло-увігнутих, а також на прямолінійних в профілі укосах, в плані – на увігнутих, улоговиноподібних і рівних ділянках. Голова зсувів зазвичай розташовується в місцях перегину профілю, де пологі ділянки укосу змінюються крутими [4].

За результатами досліджень [5] відзначено, що при постійності фізико-механічних характеристик ґрунтів вплив на значення коефіцієнта запасу стійкості надає форма і геометрія самого укосу. У роботі не враховувалися зміна рівня ґрунтових вод, можливе підрізування укосів, наявність тектонічних розломів, ярів тощо (рис. 1).

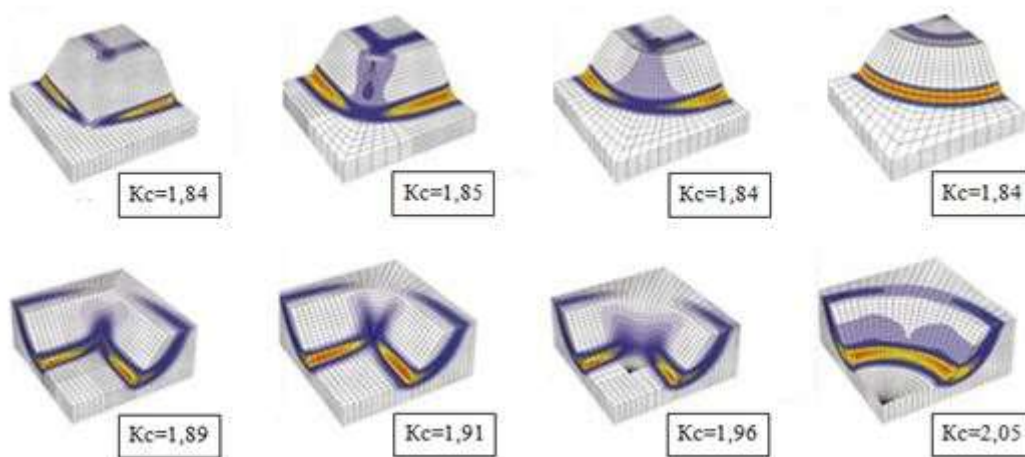


Рис. 1. Значення коефіцієнтів запасу стійкості залежно від геометричної форми розрахункових ґрунтових укосів

В ході проведення подальших досліджень, пов'язаних з урахуванням просторової роботи ґрунтових укосів на їх ступінь стійкості, було відзначено, що на результат впливає не тільки складна форма укосу в плані, але і його протяжність.

Відповідно до проведених математичних експериментів [6], в роботі розглядався однорідний ґрунтовий укіс постійної висоти «Н». Залежно від зміни довжини розрахункової схеми «В» були визначені значення коефіцієнтів запасу стійкості (рис. 2). Розрахунки виконувалися методом редукції.

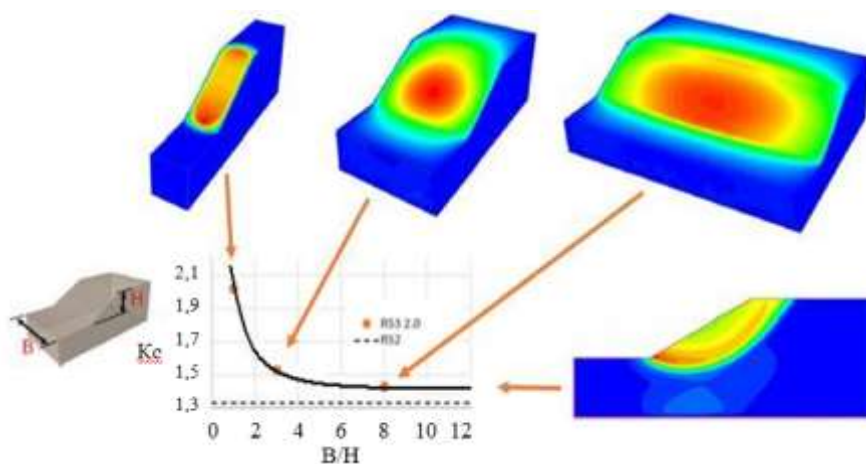


Рис. 2. Вплив довжини розрахункового укосу на його ступінь стійкості

На графіку (рис. 2) представлено залежність коефіцієнтів запасу стійкості від протяжності укосу. Так, по осі абсцис відкладалося відношення довжини укосу до його висоти, по осі ординат – значення коефіцієнта запасу стійкості.

При аналізі графіку було відзначено, що ступінь стійкості розглянутого ґрунтового укосу залежить від його геометричних розмірів, тобто при збільшенні відношення довжини «В» до висоти «Н» укосу значення коефіцієнта запасу стійкості зменшується і наближається до значення, отриманого при розрахунку даного укосу в двовимірній постановці завдання. Пунктиром показана величина коефіцієнта запасу стійкості, визначеного за двовимірною схемою методом граничної рівноваги. Так, при відношенні довжини до висоти укосу рівному 1, значення коефіцієнта запасу стійкості склало 2,0, при відношенні 3 – 1,5, при відношенні 8 – 1,4. Величина коефіцієнта запасу стійкості, отриманого при розрахунку за двовимірною схемою методом граничної рівноваги, склала 1,3.

У представлений роботі [6] можна наочно оцінити зміну поведінки ґрунтового укосу в залежності від його протяжності, а величина ступеня стійкості, в залежності від розмірів розрахункового укосу, може відрізнятись в півтора рази. Також в дослідженнях відзначено маловивченість питання впливу протяжності укосу на значення коефіцієнта запасу стійкості при моделюванні розрахункового укосу в тривимірній постановці [7, 8].

Для оцінки достовірності отриманих результатів потрібне проведення подальших додаткових досліджень, в яких необхідно враховувати не тільки довжину укосу, а його висоту і межі розрахункової області в поперечному напрямку укосу.

До просторових факторів, які впливають на ступінь стійкості ґрунтових споруд також можна віднести точкові конструкції. До них можна віднести окремі будівлі та споруди. Як було зазначено раніше, протяжність ґрунтової споруди позначається на значенні коефіцієнта запасу стійкості, а навіть одинична будівельна конструкція призводить до зменшення довжини розрахункового укосу або схилу. Також значний вплив робить конструкція основи розглянутої споруди і її планове розташування. При пальовій основі, яка перетинає передбачувану лінію ковзання, сама будівля вже є повноцінною протизсувною спорудою, яка кардинально може змінити характер, форму та напрямок можливих зсувних процесів. При плитному фундаменті або на пальовій основі, яка не перетинає передбачувану лінію ковзання, будівля або споруда може виступати в ролі, як додаткової пригрузки (будівельна конструкція розташована в пасивної частини зсувного тіла), так і навпаки – додаткового навантаження зрушення (будівельна конструкція розташована в активній частині зсувного тіла).

**Мета і завдання дослідження.** Розробка методу врахування просторового ефекту при статичних розрахунках стійкості укосів ґрунтових споруд. Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати вплив геометричних форм ґрунтових укосів на значення коефіцієнта запасу стійкості;
- виконати розрахунки стійкості ґрунтових споруд з урахуванням їх просторової роботи;
- розробити рекомендації щодо врахування просторового ефекту при статичних розрахунках стійкості укосів ґрунтових споруд.

**Методи досліджень.** Аналітичні та чисельні методи досліджень поведінки ґрунтових укосів у двовимірній постановці завдання, з урахуванням їхніх просторових особливостей. Використані методи оптимального планування експериментів із застосуванням багатофакторного математичного моделювання просторових факторів, які впливають на стійкість ґрунтових споруд.

**Результати дослідження.** При проектуванні окремо розташованої будівлі на 10-й ст. В. Фонтану в м. Одесі, яка розміщена в пасивній частині зсувного тіла, за участю автора, був відзначений ефект впливу на просторову стійкість розглянутого схилу. В роботі розглядалися два варіанти основи будівлі, що проектується:

- пальова основа з умовою не перетину передбачуваної лінії ковзання (пригрузка пасивної частини зсувного тіла) (рис. 3, а);
- пальова основа з перетином лінії ковзання (пригрузка пасивної частини зсувного тіла зі сприйняттям палями горизонтального навантаження) (рис. 3, б).

За результатами розрахунків двовимірних схем, виконаними за поперечними розрізами, які проходять як в створі проекрованої будівлі, так і в його близькості, були отримані наступні результати:

- значення коефіцієнта запасу стійкості для розрізу по створу будівлі склало 1,052;
- значення коефіцієнта запасу стійкості для розрізу, розташованого поблизу створу будівлі склало 1,012.

При розрахунку стійкості зазначеного схилу по тривимірній схемі, значення коефіцієнта запасу стійкості склало для першого варіанту влаштування основи будівлі 1,109, для другого – 1,188, що свідчить про вплив одиночної будівлі на загальну стійкість протяжної ґрунтової споруди, за рахунок його зменшення довжини. Для забезпечення нормативного значення коефіцієнта запасу стійкості, який дорівнює 1,15 (аварійне сполучення навантажень), для

першого варіанту, з метою компенсації дефіциту зсувних сил, необхідне збільшення маси проектованої споруди (вертикального навантаження). Зазначений недолік тягне за собою значне подорожчання будівництва і призводить до економічно необґрунтованих витрат. Також відзначено, що при розрахунках стійкості розглянутого схилу, розташованого на 10-й ст. В. Фонтану в м. Одесі за двомірними схемами, значення ступеня стійкості в значній мірі відрізняється від коефіцієнта, отриманого за тривимірною схемою. Цей факт також призводить до збільшення конструкцій пальової основи, перевитрати матеріалів, термінів, кількості виконуваних робіт і відповідно подорожчання проекту.

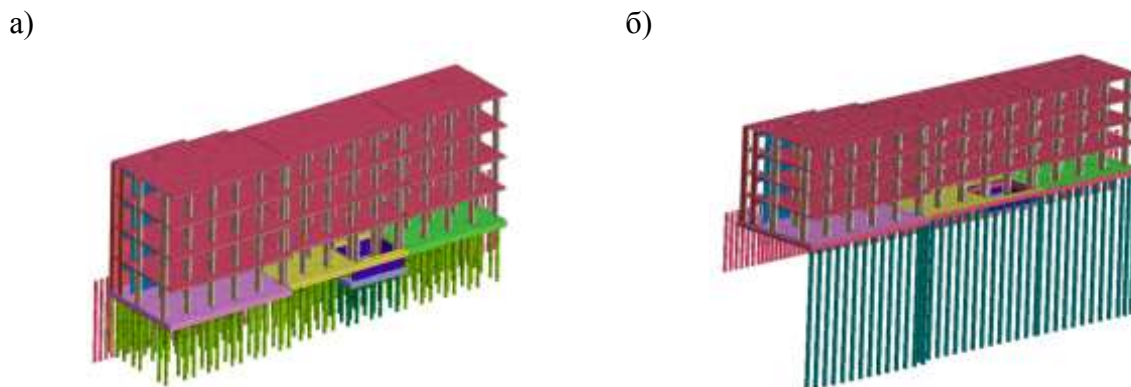


Рис. 3. Загальний вигляд конструкцій основи будівлі, що проектується:  
а – пальова основа з умовою не перетину передбачуваної лінії ковзання;  
б – пальова основа з перетином лінії ковзання

При розрахунку стійкості зазначеного схилу по тривимірній схемі, значення коефіцієнта запасу стійкості склало для першого варіанту влаштування основи будівлі 1,109, для другого – 1,188, що свідчить про вплив одиночної будівлі на загальну стійкість протяжної ґрунтової споруди, за рахунок його зменшення довжини. Для забезпечення нормативного значення коефіцієнта запасу стійкості, який дорівнює 1,15 (аварійне сполучення навантажень), для першого варіанту, з метою компенсації дефіциту зсувних сил, необхідне збільшення маси проектованої споруди (вертикального навантаження). Зазначений недолік тягне за собою значне подорожчання будівництва і призводить до економічно необґрунтованих витрат. Також відзначено, що при розрахунках стійкості розглянутого схилу, розташованого на 10-й ст. В. Фонтану в м. Одесі за двомірними схемами, значення ступеня стійкості в значній мірі відрізняється від коефіцієнта, отриманого за тривимірною схемою. Цей факт також призводить до збільшення конструкцій пальової основи, перевитрати матеріалів, термінів, кількості виконуваних робіт і відповідно подорожчання проекту.

Врахування окремих будинків в комплексі ґрунтової споруди (ґрунтовий масив, проектована будівля або споруда, конструкція фундаменту) в тривимірній постановці завдання дозволить максимально наблизитися до реальної обстановки і врахувати форму рельєфу, зміну фізико-механічних характеристик ґрунтів в просторі; геометрію і тип фундаментів; величини навантажень, що передаються на ґрунтову основу; в єдиній системі розглянути і оцінити напружено-деформований стан і стійкість схилу; із застосуванням чисельних експериментів вибирати оптимальний варіант фундаментів для проектованих будинків [9].

В ході виконання розрахунків стійкості схилу, за участю автора, на території Грецького (Місячного) парку в межах кордонів вулиць: Військового спуску, Приморського бульвару, вул. Приморської, Потьомкінських сходів в м. Одесі [10], була відмічена подібна ситуація, представлена в роботах [5, 11]. В якості вихідних даних для виконання розрахункових робіт і розробки рекомендацій був використаний Технічний звіт про інженерно-геологічні умови ділянки проектування благоустрою Грецького парку в межах вулиць: Військовий спуск, Приморський бульвар, вул. Приморська, Потьомкінські сходи в м. Одесі 2016 р. [12].

План схилу і розташування трьох обраних розрахункових поперечних перетинів показано на рис. 4.

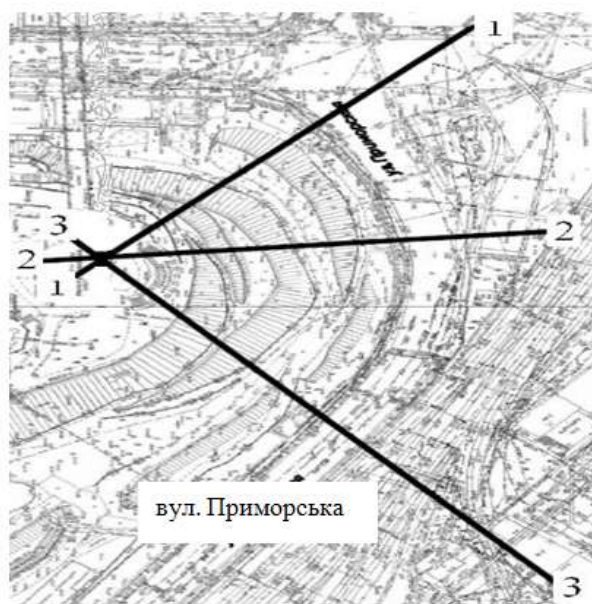


Рис. 4. План схилу і розташування розрахункових поперечників

Кількість розрахункових створів і їхнє положення в плані вибиралося, виходячи з інженерно-геологічних умов і з урахуванням необхідності врахування топографічних особливостей розглянутого схилу.

За вимогами ДБН В.1.1-46:2017 «Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів і обвалів. Основні положення» [3] для кожного зсувного схилу слід призначати як мінімум один розрахунковий створ. Для великих зсувів задають додаткові створи. Розташування основного розрахункового створу на ділянках зсувних схилів має збігатися з основним напрямком існуючого або прогнозованого руху зсуву по лінії найбільшої крутизни земної поверхні. На великих зсувних ділянках слід розглядати розрахункові створи за кількома напрямками з урахуванням можливості зміни умов стійкості в результаті будівництва та стадії розвитку.

В ході виконання роботи розрахунки стійкості схилу були виконані методами Bishop [13] і Janbu [14] за фіксованими кривими ковзання, при цьому враховувалися сили ваги блоку, сили гідродинамічного впливу ґрунтового потоку.

Результати розрахунку стійкості схилу за фіксованими кривим ковзання для трьох розрахункових створів представлені на (рис. 5).

За результатами розрахунків були отримані значення коефіцієнтів запасу стійкості:

- для розрахункового створу 1-1 за методом Bishop – 0,832 і Janbu – 0,812. Стійкість даного схилу в даному перетині не забезпечена;
- для розрахункового створу 2-2 за методом Bishop – 0,785 і Janbu – 0,813. Стійкість даного схилу в даному перетині не забезпечена;
- для розрахункового створу 3-3 за методом Bishop – 0,755 і Janbu – 0,728.

Стійкість даного схилу в даному перетині не забезпечена.

При аналізі отриманих результатів було відзначено їх невідповідність візуальним та інструментальним обстеженням даного схилу. Дана робота проводилася до виконання розрахунків з метою виявлення порушення цілісності ґрунтового масиву, виявлення заколів і зрушень «жорстких конструкцій» (паркани, бордюри, сходи, стіни і фундаменти будівель, стовпи тощо), розташованих на брівці схилу і його укосі. В результаті обстеження будь-яких ушкоджень, які могли б показувати на зрушення схилу, розташованого на території Грецького (Місячного) парку, виявлено не було.

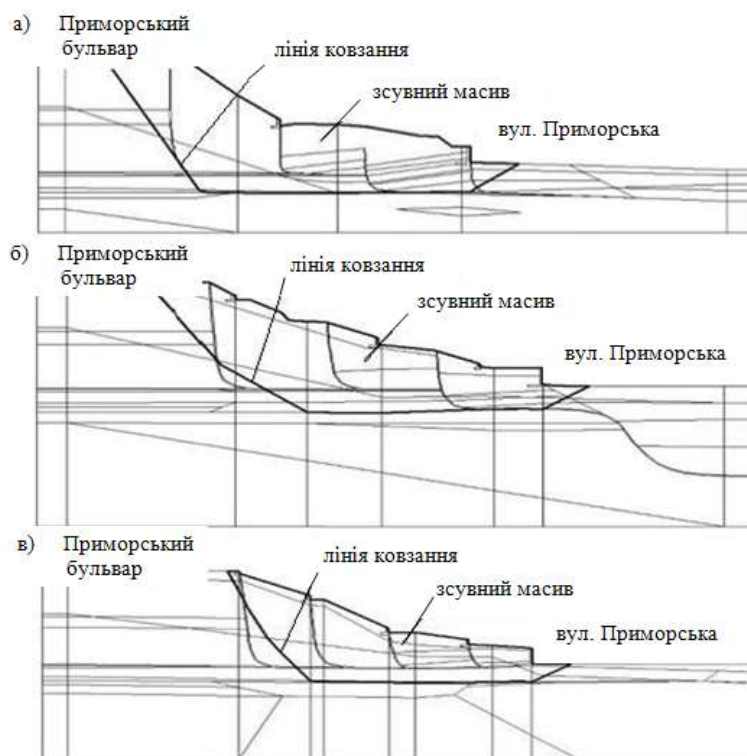


Рис. 5. Загальний вигляд зсувного тіла:  
 а – розрахунковий створ 1-1; б – розрахунковий створ 2-2; в – розрахунковий створ 3-3

Беручи до уваги [5, 15], і так як в зазначених розрахункових створах 1-1, 2-2 і 3-3 коефіцієнти запасу стійкості в значній мірі відрізняються один від одного і не перевищують 1, а схил при цьому очевидно стійкий за результатами спостережень, було прийнято рішення про визначення коефіцієнта запасу стійкості, який міг би реально оцінити стійкість схилу на цій ділянці і визначити можливі межі зсувного тіла. В даному випадку слід враховувати просторову роботу схилу, де реалізується врахування впливу розрахункових створів один з одним і сусідніх ділянок схилу з більш високим коефіцієнтом запасу стійкості.

Загальний вигляд тривимірної розрахункової схеми існуючого розрахункового схилу з межами зсувного тіла представлено на рис. 6.

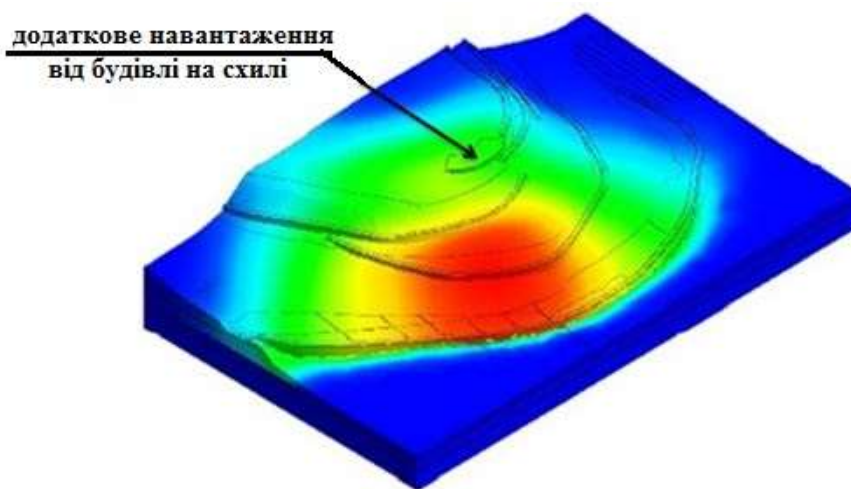


Рис. 6. Загальний вигляд тривимірної розрахункової схеми схилу на території Грещького (Місячного) парку, м. Одеса

У розрахунку була врахована топографія схилу, різномірність ґрунтів, визначених в межах проведення геологічних вишукувань, зміна рівня ґрунтових вод по всій довжині схилу та існуючі конструкції, розташовані на його брівці і по його укосу.

В результаті визначення напружено-деформованого стану в розрахунковому схилі були отримані зони максимальних дотичних напружень по ґрунту порушеної структури «плашка по плашці» і значення коефіцієнта запасу стійкості, отриманого методом редукції (зниження міцності), який склав 1,064.

Виконання розрахунків схилу, розташованого на території Грецького (Місячного) парку м. Одеси, в тривимірній постановці завдання дає результат, наближений до існуючого стану схилу, на відміну від результатів, отриманих за двовимірними схемами, а саме за методами Bishop [13] і Janbu [14]. Отримані коефіцієнти запасу стійкості в тривимірній постановці та по двовимірним схемам, з урахуванням просторового ефекту, показують, що нормативна стійкість схилу не забезпечена. Схил знаходиться в стані граничної рівноваги.

Для забезпечення нормативної стійкості схилу «Грецького парку» було передбачено споруду з трьох радіальних рядів бурових паль діаметром 800 мм (рис. 7). Крок паль і відстань між рядами паль становить 1,5 м. Відмітка забою паль -7,4 м, яка визначалася виходячи з положення лінії ковзання зсуву з фізико-механічними характеристиками ґрунту порушеної структури, а також зусиль, що виникають в палях на цій позначці. Позначки верху паль змінні і складають для першого ряду 5,0 м, для другого – 6,1 м і для третього – 7,2 м. Зазначені позначки визначалися з умови неможливості перепозання зсуву через голови паль. При розрахунках стійкості схилу були отримані величини дефіциту сил, необхідних для компенсації коефіцієнта запасу стійкості, до нормативних значень. Ці величини сил склали:

- для перетину 1-1 1915кН (з врахування просторового ефекту при розрахунках стійкості ґрунтових укосів або схилів дефіцит сил склав 1620 кН);
- для перетину 2-2 1896 кН (з врахування просторового ефекту – 1585 кН);
- для перетину 3-3 1974 кН (з врахування просторового ефекту – 1625 кН).

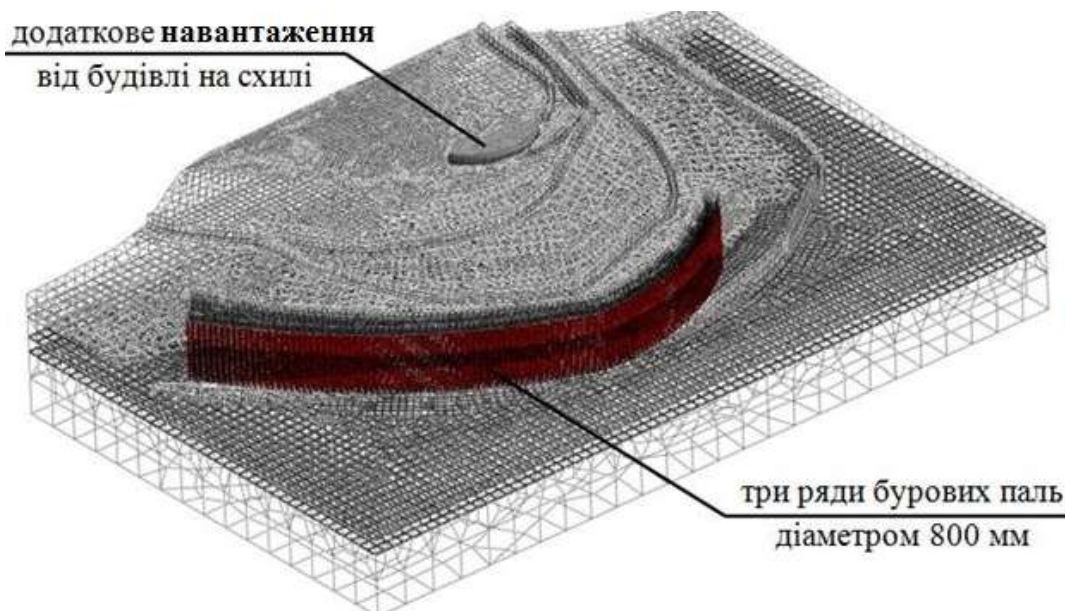


Рис. 7. Загальний вигляд розташування бурових паль протизсувної споруди «Грецького парку»

Палі приймалися одного типу в межах кожного ряду. Визначення внутрішніх зусиль (згинальних моментів і сил перерізу) в кожному типі палі відбувалось шляхом вибірки максимального зусилля в перетинах розташованих по висоті, в середньому, через 1м.

Відповідно до проведених розрахунків були отримані максимальні згинальні моменти та сили перерізу для двовимірних та тривимірної схем. Значення указаних величин представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення максимальних внутрішніх зусильв палях протизсувної конструкції «Грецького парку»

Внутрішні зусилля	Двовимірна схема	Тривимірна схема
Згинальний момент, т·м	71,0	52,0
Сила перерізу, т	65,0	46,0

Підбір армування бурових паль виконувався за допомогою програмного комплексу «SCAD». Палі встановлюються в ґрунті шляхом заповнення пробурених свердловин бетонною сумішшю марки С25/30 на сульфатостійкому портландцементі з маркою по морозостійкості і водонепроникності F150 і W6 відповідно, з установкою зварних металевих каркасів з поздовжньою арматурою класу А500С і поперечною арматурою класу А240С.

Результати підбору армування для тривимірної схеми представлені на рис. 8. Захисний шар бетону для поздовжньої арматури прийнято 50 мм.

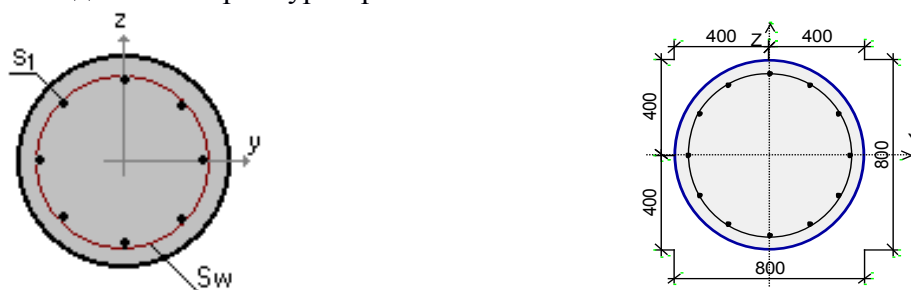


Рис. 8. Результати підбору армування для тривимірної схеми: поздовжня арматура S1 – 12Ø22; поперечна арматура SW – Ø12; крок поперечної арматури 150 мм

Значення коефіцієнтів використання прийнятого армування представлені в табл. 2.




Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів використання прийнятого армування для розрахунків тривимірної схеми конструкцій протизсувної споруди

	Перевірка	Коефіцієнт	Графічне відображення
1	Міцність за граничним моментом перетину	0,873	
2	Міцність по похилій смузі між похилими тріщинами	0,358	
3	Міцність по похилій тріщині	0,830	

Аналізуючи результати підбору армування бурових паль конструкцій протизсувної споруди можна зробити висновок про достатню кількість назначеної як повздовжньої, так і поперечної арматури та коефіцієнт використання не перевищує 1,0.

При розгляді результатів розрахунку двовимірних схем відзначено, що використання однакового типу армування, отриманого для тривимірних схем не допустимо, так як попередньо підібрана кількість армування не забезпечує міцність бурових паль і коефіцієнт використання, в даному випадку перевищує 1,0 (табл. 3).

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів використання прийнятого армування для розрахунків двовимірної схеми конструкцій протизсувної споруди

	Перевірка	Коефіцієнт	Графічне відображення
1	Міцність за граничним моментом перетину	1,192	
2	Міцність по похилій смузї між похилими тріщинами	0,506	
3	Міцність по похилій тріщині	1,173	

Для забезпечення міцності елементів конструкцій протизсувної споруди необхідно збільшувати кількість розрахункової арматури (повздовжньої та поперечної), що призведе до необґрунтованого збільшення запасу міцності всієї споруди та збільшення вартості робіт по забезпеченню нормативної стійкості укосу «Грецького парку».

Результати підбору армування для двовимірної схеми представлені на рис. 9. Захисний шар бетону для повздовжньої арматури прийнято 50 мм.

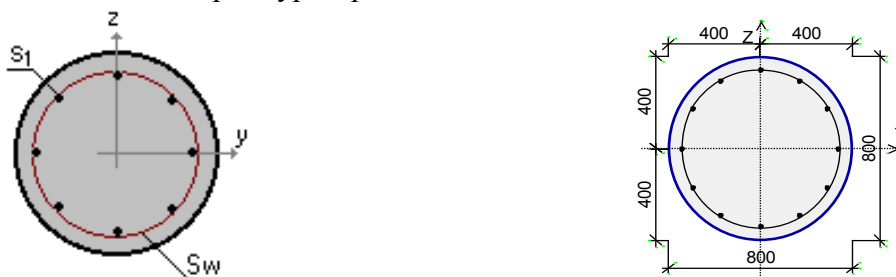
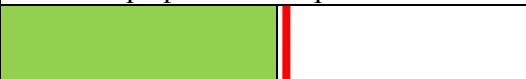




Рис. 9. Результати підбору армування для двовимірної схеми: повздовжня арматура S1 – 12Ø25; поперечна арматура SW – Ø14; крок поперечної арматури 100 мм

Значення коефіцієнтів використання прийнятого армування представлені в табл. 4.

Таблиця 4 – Значення коефіцієнтів використання прийнятого армування для розрахунків двовимірної схеми конструкцій протизсувної споруди

	Перевірка	Коефіцієнт	Графічне відображення
1	Міцність за граничним моментом перетину	0,955	
2	Міцність по похилій смузї між похилими тріщинами	0,475	
3	Міцність по похилій тріщині	0,926	

Якщо порівнювати результати розрахунків стійкості трьох розрахункових поперечних розрізів, отриманих за двовірними схемами методами Bishop [13] і Janbu [14] з результатами застосування запропонованої моделі врахування просторових ефектів, можна відзначити, що значення розрахункового згинального моменту і сил перерізу, що діють на палі протизсувної споруди були знижені в середньому на 20 %. Цей фактор призводить до:

- зменшення розрахункового зсувного тиску на утримуючі конструкції;
- зниження розрахункових внутрішніх зусиль, що виникають в елементах протизсувної конструкції (згинальні моменти і сили перерізу), відповідно до зменшення міцності (класу) бетону, зниження діаметрів і кількості як повздовжньої, так і поперечної арматури.

**Висновки:**

1. На основі аналізу ряду робіт за двовірним і тривірним моделюванням ґрунтових укосів було показано, що оцінка стійкості ґрунтових укосів є складним, відповідальним і маловивченим завданням.

2. Виконання розрахунків ґрунтових укосів в тривимірній постановці завдання, дає 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 ґрунтового укосу. Тривимірне моделювання ґрунтових укосів також дозволяє враховувати фактори, що роблять істотний вплив на стійкість, які не можна врахувати при двовимірному моделюванні (особливості топографії, наявність підрізування укосів, ярів, точкових будівельних конструкцій тощо).

3. Одним з важливих переваг просторової оцінки стійкості ґрунтового укосу є те, що такий розрахунок дозволяє прогнозувати розвиток зсувного процесу не тільки по глибині досліджуваного розрізу ґрунтового масиву, але і в плані.

### Література

1. ДБН В.1.1–12:2014. Будівництво в сейсмічних районах України. [Чинний від 2014-10-01]. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. 110 с.

2. ДБН В.2.4–20:2014. Греблі з ґрунтових матеріалів. Основні положення. [Чинний від 2014-11-13]. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. 126 с.

3. ДБН В.1.1–46:2017. Інженерний захист територій, будівель та споруд від зсувів та обвалів. Основні положення. [Чинний від 2017-11-01]. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. 47 с.

4. Методические рекомендации по предотвращению оползней на автомобильных дорогах Таджикской ССР. Государственный Всесоюзный дорожный научно-исследовательский институт (СоюзДорНИИ). М. 1977. 52 с.

5. Zhang C., Yingbin et al. Effects of geometries on three-dimensional slope stability. *Canadian Geotechnical Journal*. 2013. Vol. 50, No. 3. P. 233–239.

6. Thamer Yacoub Using Shear Strength Reduction Method for 2D and 3D Slope Stability Analysis. President, Rocscience Inc. 2016. 521 с.

7. Fomenko I. K., Zerkal O. V. Proceeding of the technical meeting TC207 – Workshop on soil-structure Interaction and Retainig Walls. *Tree-dimensional slope stability analysis. Dubrovnic*. 2011. P. 125–129.

8. Фоменко И. К., Зеркаль О. В. Преимущества методов оценки устойчивости склонов в трехмерной постановке. *Геотехника*. 2011. № 5. С. 38–41.

9. Менабдишвили П. З. Исследование влияния рельефа и состава пород на устойчивость склонов в неблагоприятных инженерно-геологических и сейсмических условиях. *Збірник наукових праць Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2017. Вип. 100, С. 108–111.

10. Отчет «Расчет устойчивости склона на территории Греческого (Лунного) парка в пределах границ улиц: Военного спуска, Приморского бульвара, ул. Приморской, Потемкинской лестницы в г. Одессе», 2016. 41 с.

11. Бондаренко А. В., Великий Д. И., Егупов К. В., Слободянюк В. П. Сравнительный анализ расчета устойчивости однородных ґрунтовых плотин для плоской и объемной задач. *Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2012. № 76. С. 320–325.

12. Технический отчет о инженерно-геологических условиях участка проектирования благоустройства Греческого парка в пределах улиц: Военный спуск, Приморский бульвар, ул. Приморская, Потемкинская лестница в г. Одессе, 2016. 26 с.

13. Bishop A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique*. 1955. №5. P. 7–17.

14. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis. *In Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes Stockholm, Sweden. Balkema, Rotterdam*. 1954.

P. 43–49.

15. Гаврилов А. В. Оценка устойчивости оползневых склонов на основе трехмерного моделирования. *Инженерная геология*. 2013. №6. С. 46–55.

### References

- [1] DBN V.1.1–12:2014. Budivnictvo v sejsmichnih rajonah Ukrajini. K.: Ministerstvo regionalnogo rozvitku, budivnictva ta zhitlovo-komunalnogo gospodarstva Ukrajini, 2014.
- [2] DBN V.2.4–20:2014. Grebli z gruntovih materialiv. Osnovni polozhennya. K.: Ministerstvo regionalnogo rozvitku, budivnictva ta zhitlovo-komunalnogo gospodarstva Ukrajini, 2014.
- [3] DBN V.1.1–46:2017. Inzhenernij zahist teritorij, budivel ta sporud vid zsuviv ta obvaliv. Osnovni polozhennya. K.: Ministerstvo regionalnogo rozvitku, budivnictva ta zhitlovo-komunalnogo gospodarstva Ukrajini, 2017.
- [4] Metodicheskie rekomendatsii po predotvrashcheniyu opolzney na avtomobilnykh dorogakh Tadzhijskoy SSR. Gosudarstvennyy Vsesoyuznyy dorozhnyy nauchno-issledovatel'skiy institut (SoyuzDorNII). M. 1977.
- [5] C. Zhang, Yingbin et al., "Effects of geometries on three-dimensional slope stability", *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 50, no. 3, pp. 233-239, 2013.
- [6] Thamer Yacoub, *Using Shear Strength Reduction Method for 2D and 3D Slope Stability Analysis*, President, Rocscience Inc., 2016.
- [7] I. K. Fomenko, O. V. Zerkal, "Proceeding of the technical meeting TC207 – Workshop on soil-structure Interaction and Retaining Walls", *Tree-dimensional slope stability analysis. Dubrovnic*, pp. 125-129, 2011.
- [8] I. K. Fomenko, O. V. Zerkal, "Preimushestva metodov ocenki ustojchivosti sklonov v trehmernoj postanovke", *Geotekhnika*, no. 5, pp. 38-41, 2011.
- [9] P. Z. Menabdishvili, "Issledovanie vliyaniya relefa i sostava porod na ustojchivost sklonov v neblagopriyatnykh inzhenerno-geologicheskikh i sejsmicheskikh usloviyah", *Zbirnik naukovih prac Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie*, no. 100, pp. 108-111, 2017.
- [10] Otchet "Raschet ustojchivosti sklona na territorii Grecheskogo (Lunnogo) parka v predelakh granic ulic: Voennogo spuska, Primorskogo bulvara, ul. Primorskoj, Potemkinskoj lestnicy v g. Odesse", 2016.
- [11] A. V. Bondarenko, D. I. Velikij, K. V. Egupov, V. P. Slobodyanyuk, "Sravnitelnyj analiz rascheta ustojchivosti odnorodnykh gruntovykh plotin dlya ploskoj i obemnoj zadach", *Budivelni konstrukciyi: mizhvidomchij naukovno-tehnichnij zbirnik*, no. 76, pp. 320-325, 2012.
- [12] "Tehnicheskij otchet o inzhenerno-geologicheskikh usloviyah uchastka proektirovaniya blagoustrojstva Grecheskogo parka v predelakh ulic: Voennyj spusk, Primorskij bulvar, ul. Primorskaya, Potemkinskaya lestnica v g. Odesse", 2016.
- [13] A.W. Bishop, "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", *Géotechnique*, no 5, pp. 7-17, 1955.
- [14] N. Janbu, "Application of composite slip surface for stability analysis", *In Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes Stockholm, Sweden. Balkema, Rotterdam*, pp. 43-49, 1954.
- [15] A. V. Gavrilov, "Ocenka ustojchivosti opolznevyykh sklonov na osnove trehmernogo modelirovaniya", *Inzhenernaya geologiya*, no 6, pp. 46-55, 2013.

**STABILITY OF EARTH STRUCTURES  
TAKING INTO ACCOUNT THE SPATIAL EFFECT**

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

<sup>1</sup>**Dmytriev S.V.**, PhD., Assistant Professor,  
tele@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6523-5464

<sup>1</sup>**Velykiy D.I.**, PhD,  
denislusuj@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1452-6742

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

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

**Abstract.** Problems of stability of soil structures and the development of landslides, including the Black Sea coast, pose a significant danger to the population and existing buildings and structures. The development of landslides and landslide-prone slopes requires careful and detailed study, the results of which should be the basis for the implementation of measures for engineering protection of territories, taken into account in the design and construction of new facilities. When calculating the stability of slopes, there is a difference in the calculated values of the coefficients of stability in two-dimensional and three-dimensional problem statements. Analysis of the research indicates the need to take into account the influence of topographic conditions of the entire slope when calculating it in two-dimensional schemes within the designated areas.

Determination of the coefficient of stability can be carried out by both analytical and graph-analytical methods. In most cases, the calculation of the stability of slopes and escarpment and the determination of the coefficient of stability is performed for two-dimensional sections constructed on lines that coincide with the most probable direction of shift of the shear body.

The most common methods used in calculating the stability of slopes in a two-dimensional problem statement are the most used because of their simplicity, but these methods are based on the acceptance of some assumptions described above. Based on the analysis of a number of works on two-dimensional and three-dimensional modeling of soil slopes, it is shown that the assessment of the stability of landslides is a complex, responsible and poorly studied task.

Performing calculations of soil slopes in the three-dimensional formulation of the problem gives results close to reality, in contrast to the results obtained by conventional and common engineering methods for two-dimensional schemes. This is due to the fact that the three-dimensional formulation of the problem takes into account the combination of engineering and geological conditions of the entire slope. Three-dimensional modeling of soil slopes also allows taking into account factors that have a significant impact on stability, which cannot be taken into account in two-dimensional modeling (features of topography, the presence of trimming slopes, ravines, point structures, etc.).

**Keywords:** soil structure, stability factor, artificial embankment, landslide slope, soil slope, stability, relief forms, calculation method, three-dimensional scheme, two-dimensional scheme.

Стаття надійшла до редакції 7.03.2023

**ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИКОНАННЯ ДЕМОНТАЖУ  
КОНСТРУКЦІЙ ПОШКОДЖЕНИХ ВЕЛИКОПАНЕЛЬНИХ БУДИНКІВ**

<sup>1</sup>Григоровський А.П., здобувач,  
a.grigorovski@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0009-2358

<sup>1</sup>Броневицький А.П., к.т.н.,  
andbron.gm@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4841-622X  
<sup>1</sup>ДП«Науково-дослідний інститут будівельного виробництва»  
проспект Валерія Лобановського 51, м. Київ, 03037, Україна

**Анотація.** Протягом останнього року, внаслідок воєнних дій викликаних агресією Російської Федерації, в Україні зруйновано або пошкоджено близько 17,5 тисяч багатоквартирних житлових будинків. Це відповідає 10% від загальної кількості багатоквартирних житлових будинків в Україні.

Переважає більшість зруйнованих багатоквартирних будинків є панельного типу. Пошкоджене житло підлягає відбудові або ремонту. Під час виконання цих робіт, складовим етапом є демонтаж зруйнованих конструкцій.

В статті викладено основні організаційно-технологічні особливості виконання демонтажу конструкцій панельних будинків. Систематизовано дозвільну та проектну документацію, на основі якої виконуються роботи. Проаналізоване вітчизняне законодавство в частині виконання демонтажних робіт.

Наведено основні етапи виконання демонтажу конструкцій панельних будівель. Особливості виконання робіт та технологію вказано для кожного виду конструкцій. Викладено перелік основного матеріально-технічного забезпечення виконання робіт на прикладі типового крупнопанельного житлового будинку.

В статті також надано перелік основних чинних вимог щодо техніки безпеки, охорони праці та екологічності виконання робіт.

Проаналізовано наукові праці вітчизняних та закордонних вчених по цьому напрямку дослідження будівельної науки.

З огляду на значний обсяг зруйнованого житла, в Україні прийнято ряд законодавчих актів, які дерегулюють процес демонтажу будівель та окремих конструкцій. На місцеве самоврядування покладено вирішення доцільності демонтажу тієї або іншої будівлі. Відповідальність за належне оформлення проектної документації та виконання робіт у відповідності до вимог чинного законодавства лежить на виконавці робіт.

Нормативно-законодавча база щодо відновлення, знесення та демонтажу вимагає доопрацювання з точки зору оптимізації і спрощення процедурних питань у тому числі врахування реалій залучення до цих процесів іноземних благодійних інвесторів та необхідності оптимізації оподаткування таких робіт в умовах військового часу.

Запропонована технологія базується на досвіді демонтажних та відновлювальних робіт за наслідками вибухів побутового газу та оперативно вдосконалюється з врахуванням особливостей робіт у військовий час та під час інших надзвичайних ситуацій.

**Ключові слова:** реконструкція, відбудова, великопанельні будинки, демонтаж, організація, технологія будівництва.

**Постановка науково-прикладної проблеми.** Проблеми, що постають перед житлово-будівельним комплексом України відносно ліквідації наслідків аварійних руйнувань будівель понаднормовими впливами внаслідок воєнних дій викликаних агресією Російської Федерації поділяються на декілька напрямків, основними з яких, на нашу думку, є:

1) першочергові аварійно-рятувальні роботи безпосередньо після нанесення ракетно-бомбових ударів що спричинили руйнування будівлі;

2) планове відновлення, шляхом підсилення, ремонту та відбудови, об'єктів, пошкоджених внаслідок воєнних дій;

3) будівництво нового житла на заміну втраченого в результаті воєнних дій методами швидкого зведення;

4) нове будівництво за програмами післявоєнного відновлення.

Вирішення наведених питань потребує комплексного дослідження [1].

Підсилення, ремонт, відбудова та нове будівництво, як правило, супроводжується частковим або повним демонтажем будівлі. Виконання дефонтажних робіт крупнопанельних багатоквартирних будинків і є предметом цієї статті, ці будинки складають велику частину від загальної кількості зруйнованого та пошкодженого житла [2].

Ефективність виконання демонтажних робіт залежить від ряду організаційно-технологічних чинників, які мають свої особливості, та які варто дослідити.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питаннями, пов'язаними з дослідженням технології та організації демонтажу панельних будинків такі вітчизняні фахівці як: Ушацький С.А., Черненко К.В., Григоровський П.Є., Тугай Я.Б., Осипов О.Ф., Шатов С.В.,

Тема цієї статті достатньо досліджена як вітчизняними, так і іноземними науковцями, такими як Maciej Wardach, P.M. Teuffel, Gian Andrea Blengini та інші, проте слід систематизувати та оновити наявну інформацію з огляду на останні зміни у вітчизняному законодавстві та з врахуванням практики виконання робіт.

**Метою роботи** є систематизація основних організаційних та технологічних рішень під час виконання демонтажу конструкцій крупнопанельних будинків в Україні.

Основними завданнями роботи визначено:

– систематизація вже виконаних наукових досліджень цієї теми дослідження;

– вивчення особливостей вітчизняного діючого законодавства;

– аналіз практичного досвіду виконання робіт;

– оцінка основних напрямків та перспективи удосконалення виконання демонтажних робіт, особливо в розрізі необхідності відновлення та компенсації втраченого житлового фонду внаслідок військових дій;

**Методика дослідження.** Для написання цієї статті використовувалися теоретичний метод критичного аналізу наукових праць вітчизняних та іноземних вчених, вивчення вітчизняного законодавства в цій сфері а також емпіричний метод практичного досвіду виконання робіт.

**Основна частина.** Комплексний процес розбирання будівельних конструкцій передбачає повне чи часткове руйнування з подальшою переробкою чи транспортуванням для утилізації (рис. 1).

Руйнування будівельних конструкцій – це спрямований вплив на матеріал останніх з метою їх ліквідації [3].



Рис. 1. Склад комплексного процесу розбирання будівельних конструкцій

Розбирання будівельних конструкцій – це процес з їх видалення з повним або частковим руйнуванням складових їх елементів [3].

Механізований процес розбирання будівельних конструкцій, після руйнування лише в'язевих і кріпильних елементів, називають *демонтажем конструкцій*.

В цій статті наведено типовий підхід до аналізу кола організаційних та технологічних рішень щодо демонтажу саме крупнопанельних будинків.

*До організаційних особливостей* виконання демонтажних робіт відноситься:

- отримання вихідних даних, в тому числі звіту щодо обстеження будинку;
- прийняття рішення щодо виконання демонтажних робіт;
- розробка проектної документації;
- формування переліку підготовчих робіт та інше.

Розробці проектних рішень щодо повного або часткового демонтажу має передувати проведення обстеження будівлі. Під час формування висновків слід також враховувати умови та час експлуатації конструкцій будівлі. Наявність або відсутність інших (окрім руйнувань військового характеру) негативних чинників, які могли постійно або періодично впливати на будівлю [4].

*Основними проектними документами*, згідно яких виконується демонтажні роботи є ПОБ (проект організації будівництва) та ПВР (проект виробництва робіт).

Проект організації будівництва є основою для розробки ПВР підрядною організацією. В ПВР фактично уточнюються рішення ПОБ.

При складанні обох документів слід виділити:

- опис замовлення по якому виконано ППР та інші загальні положення виконання робіт;
- змінність виконання робіт (одна або дві);
- характеристика умови виконання робіт, наявність або відсутність підготовчих робіт на місці аварії. Вказується, що необхідно виконати для початку виконання робіт;
- на підставі якої дозвільної документації виконуються роботи.

*Характеристика умов виконання робіт* має включати наступні пункти:

- опис адреси об'єкта, оточуючого середовища;
- загальний опис аварійності ситуації в будівлі, які елементи пошкоджено;
- опис типового проекту панельного будівництва, за яким споруджено будинок;
- загальні дані про розміри будівлі в плані, висота поверхів, поверховість;
- особливості каркасу, характеристика фундаментів будівлі, перекриття та вертикальних елементів каркасу;
- зовнішнє опорядження фасадів.

Серед організаційних питань одним із головних є необхідність *отримання дозвільної документації*, оформлення акту допуску виконавця на місце робіт та наряду-допуску. Згідно останніх змін в законодавстві, скасовано отримання дозволу на виконання робіт, а рішення щодо демонтажу частини або всієї споруди приймається виконавчими органами місцевої влади, адміністрації на основі вихідних даних, в тому числі звіту обстеження будівлі, який розробляється кваліфікованою організацією. Проектна документація на демонтаж також не підлягає експертизі [5].

Також організаційно необхідно до початку виконання робіт, визначитися з переліком підготовчих робіт, до яких можуть відноситись:

- винесення та перенесення комунікацій та тимчасових споруд;
- встановлення інвентарних споруд, доставка всіх необхідних матеріалів;
- розбивка та винесення осей і репера, передача по акту координат;
- інструктаж щодо техніки безпеки та технології і організації;
- розробка заходів щодо пожежної безпеки;
- визначення балансоутримувача комунікацій будинку та формування бази креслень.

Необхідно забезпечити умови збереження позначень вісей та репера.

*Технологія виконання демонтажних робіт* типового крупнопанельного будинку має особливості, які залежать від типу конструкції [6].

Демонтаж будинку виконується в послідовності, зворотній його зведення, тобто зверху

вниз, по поверхах, двома захватками баштовим краном способом «на себе».

Послідовність демонтажу конструкцій на типовій захватці типового поверху (не аварійних) наступна:

- демонтаж блоків інженерних комунікацій і елементів сходової клітини;
- демонтаж перегородок і вентиляційних блоків, санітарно-технічних кабін;
- демонтаж огорож балконів і лоджій, панелей внутрішніх і зовнішніх стін;
- демонтаж плит балконів і лоджій, плит перекриття [7].

*Розбирання інженерних комунікацій* виконується до розбирання огорожувальних та несучих конструкцій у наступній послідовності:

– розбирання внутрішніх інженерних мереж (тепло-, водо-, газо- та електропостачання, каналізація);

- зняття віконних рам і дверей з коробками, дерев'яних шаф і інших дерев'яних елементів;
- зняття покриття підлог (дошок, лінолеуму, паркету, розбирання стяжок).

Матеріали розбирання (дерево, метал, кераміка, скло, тощо) сортують за видами і складують в відповідні контейнери (пакети).

*До демонтажу даху, стін і фундаменту будинку виконують такі роботи:*

– тимчасове закріплення демонтованих елементів будинку за допомогою технологічної оснастки;

– розшивання замонолічених стиків і швів відбійними молотками з комплектом ударних насадок;

– різання заставних деталей – газова або відрізними колами;

– свердління (пробивання) отворів в панелях і плитах: діаметром 40–50 мм ручними свердлильними машинами, 40–60 мм – перфораторами, 85–160 мм – свердлильним верстатом.

Відривання і зміщення конструкцій здійснюють домкратом клиновим. Висота підхвату 6 мм – 100 мм. Підйом на 45-150 мм.

Демонтаж блоків інженерних комунікацій і елементів сходової клітини. Блоки інженерних комунікацій демонтують по поверхах, руйнуючи спирання залізобетонного піддону блоку на суміжні панелі стін сходової клітки. Для демонтажу об'ємних елементів шахти ліфтів розбирають кронштейни, що кріплять напрямні кабінні і противаги. Демонтаж сходів починають з розбирання огорож майданчиків і маршів, потім розбирають суміжні плити перекриття і міжповерхові сходові майданчики. Звільнені від зв'язків марші видаляють з місця установки вилковими захватами (рис. 2).



Рис. 2. Стропування сходових маршів вилковими захватами ЗСМ (захват для сходових маршів) шириною до 1500 мм вантажопідйомність до 2,0 т

*Демонтаж перегородок і вентиляційних блоків, санітарно-технічних кабін.* Панелі перегородок тимчасово закріплюють підкосами або трикутними стійками в поєднанні з кутовими зв'язками (панелі з прорізами) і з двома кутовими зв'язками (суцільні панелі).

Демонтаж вентиляційних блоків з опорних полиць ведеться по поверхах. Видаляють кріплення вентиляційного блоку в отворах перекриття і демонтують блок з поверху. Видаляють за потреби водопровідний і каналізаційний стояки. Санітарно-технічні кабінні звільняють від зв'язків і пружних звукоізолюючих прокладок, укладених по перекриттю,

потім демонтують кабінку [3].

*Демонтаж огорожень балконів і лоджій, панелей зовнішніх і внутрішніх стін.* При демонтажі панелей виконуються наступні операції: підготовка панелі до стропування, що включає пристрій з тимчасовим кріпленням до перекриття або до внутрішньої стіни за допомогою інвентарної оснащення, звільнення від бетону (розчину) і різка постійних зв'язків на зварюванні, прибирання оснащення тимчасового кріплення, відрив панелі від подушки за допомогою клинового гідравлічного домкрата, вивішування на гаку, переміщення панелі на транспортний засіб (панелевоз). Демонтаж огорожень балконів і лоджій проводиться «за місцем».

Демонтаж огорожувальних та несучих конструкцій будинку складається з демонтажу внутрішніх і зовнішніх стінових панелей, плит та блоків. До демонтажу зовнішні та внутрішні стінові панелі повинні бути закріплені. Для цього в панелях на висоті 1,6 – 1,8 м від рівня підлоги свердлять отвори, в які вставляють анкери для тимчасово закріплення підкосів (рис. 3).

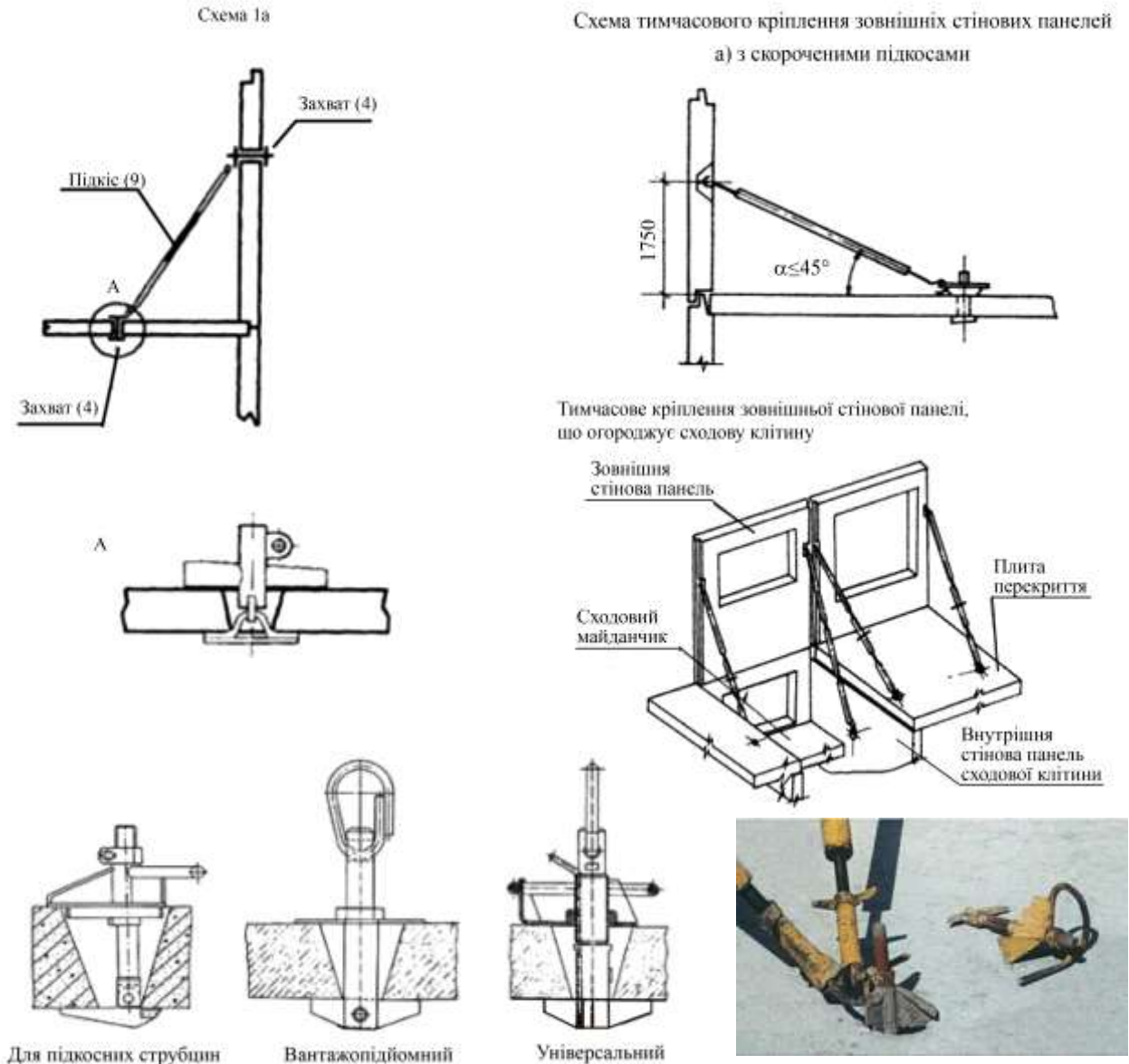


Рис. 3. Схеми тимчасового закріплення стінових панелей

*Демонтаж плит балконів і лоджій, плит перекриття.* Балконні плити тимчасово можуть бути закріплені не тільки за допомогою стійок, а й з боку внутрішнього контуру будинку шляхом укладання на них стандартних бетонних блоків, наприклад ФБС-12-3-3 т масою 270 кг.

Плити балконів і лоджій звільняють за допомогою різання від постійних зв'язків на зварюванні з суміжними плитами перекриття.

Плити балконів і лоджій відривають домкратами від цементного розчину посадочних місць. Стропування плит здійснюється, як правило, за пророблені в них демонтажні отвори. Демонтаж плит перекриття починають з демонтажу плит, що примикають до сходово-ліфтового вузла: звільняють від зв'язків на зварюванні між собою, відривають домкратами [6].

Демонтаж проводиться з дотриманням принципу: «на себе» і «на кран». Для плит перекриття застосовується захоплення, один з варіантів конструкції якого наведено на рис. 4.

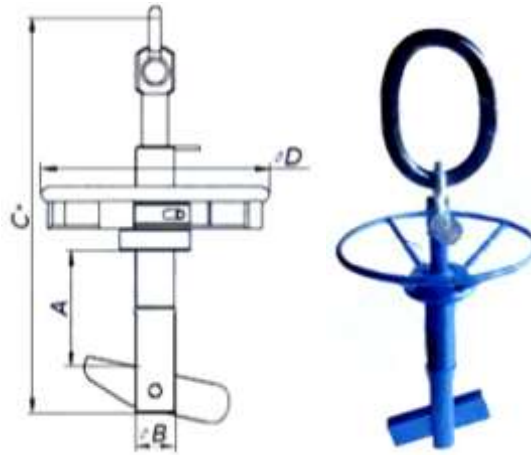


Рис. 4. Захват для плит

Проти цих отворів в плитах перекриття (в підлозі) свердлять отвори, вставляють анкери та з'єднують їх між собою, закріплюючи кожену панель.

Потім проводиться *розбирання перегородок і стін санітарно-технічних кабін*.

Балкони перед розбиранням зовнішніх стінових панелей підпирають телескопічними стійками з нижнього поверху.

*Демонтаж зовнішніх і внутрішніх стінових панелей і блоків* здійснюється описаним вище способом.

*Демонтаж покрівлі* складається з розбирання покрівельного покриття, плит (настилів), фризівих панелей і плит покриття.

Демонтаж покрівельних плит роблять так само, як і плит перекриття на типовому поверсі. Демонтаж покрівельних плит починають з видалення лоткові плит, потім видаляють інші плити, дотримуючись при цьому принцип демонтажу «на себе». Видалення водостічних воронки, розбирання примикань, руйнування закладення стиків виробляються за місцем.

Замонолічені стики, шви, металеві зв'язки покрівельних плит (настилів) повинні бути звільнені від розчину.

Стропування покрівельних плит виробляється за допомогою стропа (4СК) і чотирьох захоплень, що встановлюються в спеціально просвердлені (пробиті) отвори. Для стропування можна використовувати два двопетльовий (СКП) або кільцевих (СКК) стропа. Потім здійснюють краном слабкий натяг стропа, і робочі розрізають металеві зв'язку.

Покрівельну плиту відривають гідроклинів (металевими клинами) і піднімають на кілька сантиметрів краном при найменшій швидкості, щоб переконатися, що вона не затиснена. Перед підйомом покрівельну плиту переміщують на висоту 20–30 см і переконуються в надійності стропування. Таким же способом демонтують фризіві панелі, карнизи блоки і плити покриття будинку [7].

*Демонтаж технічного підпілля.* До зняття плит перекриття (настилів) над технічним підпіллям необхідно викопати ґрунт, наприклад екскаватором (зі зміщеною віссю копання), по зовнішньому периметру будинку на глибину закладення фундаменту. Зовнішні цокольні панелі і внутрішні панелі зміцнюють тимчасово поздовжніми зв'язками. Після зняття плит перекриття (настилів) руйнують відбійними молотками бетонну підготовку, звільняють зсередини фундамент від ґрунту. Потім демонтують, використовуючи описані вище прийоми, цокольні панелі (блоки стін) підпілля і блоки фундаменту. Звільнення елемента від зв'язків виконують,

як правило, на підвісі гака крана. При цьому в загальному випадку необхідно:

- піднімати і перемішати елемент плавно, без ривків, розгойдування і обертання;
- переміщення елемента здійснювати в два етапи: спочатку на висоту 20–30 см, а подальше – після перевірки надійності стропування;
- перевірити надійність стропування, при піднятті не допускати поштовхів і ударів.
- подається до місця навантаження на транспортний засіб елемент опускати і приймати на висоті не більше 1 м, а наводити на висоті 30 см від рівня установки в транспортне положення.

Виконання робіт при температурі повітря нижче  $-20^{\circ}\text{C}$  не рекомендується. Демонтаж збірних елементів будинку в зимовий час (при середньодобовій температурі нижче  $+5^{\circ}\text{C}$  і мінімальної добової температурі нижче  $0^{\circ}\text{C}$ ) проводиться відповідно до ВСН 202-90. У разі утворення криги і снігу в стиках поверхні панелей слід очищати металевими щітками або шкребками, продувати стисненим повітрям. Забороняється відігрівати і очищати поверхні панелей паром або гарячою водою [7].

Технологія та організація виконання демонтажних робіт часто пов'язані між собою. Так до організаційних питань ефективности виконання робіт можна віднести:

- оформлення виконавчої документації;
- здійснення заходів протипожежної безпеки;
- охорона навколишнього середовища;
- охорона праці та техніка безпеки [3].

*Виконавча документація* є засобом підтвердження відповідності виконаних робіт встановленим вимогам та проектній документації.

Під час виконання робіт необхідно:

- вести загальний журнал робіт, основний виробничий документ, який містить інформацію про послідовність, терміни та умови виконання робіт;
- спеціальні журнали виконання робіт;
- оформляти безпосередньо виконавчу документацію на відповідність проекту або із зазначенням змін;
- вести перелік осіб, що виконують роботу (підрядник);

В журналі виконання робіт вказується також методи виконання робіт, матеріали, готові вироби та конструкції, механізми що використовуються, вимушені простоти та інше. В журнал вносяться зауваження осіб, які контролюють виконання і безпеку робіт у відповідності з наданими їм правами.

Роботи необхідно виконувати із дотриманням чинних законодавчих та нормативно-правових актів, нормативних документів із питань *пожежної безпеки*.

Під час виконання демонтажних робіт необхідно як дотримуватись правил пожежної безпеки, так і здійснювати протипожежну профілактику. Відповідальним за всі ці заходи є генпідрядник або підрядник робіт. Безпосередньо відповідальна особа визначається наказом.

З метою убезпечення потрапляння на об'єкт демонтажу, організовується цілодобова його охорона. Приміщення, де виконуються вогнебезпечні роботи, повинні бути забезпечені вогнегасниками та іншими засобами пожежогасіння.

Перед початком виконання демонтажних робіт, необхідно перевірити наявність та відкритість під'їздних шляхів до місця виконання робіт.

У разі виявлення пожежі або запаху диму, гару, надмірного підвищення температури необхідно негайно повідомити про це пожежну охорону, здійснити оповіщення працівників про пожежу, вимкнути все обладнання, організувати евакуацію людей.

Демонтажні роботи повинні здійснюватись із дотриманням вимог чинного законодавства щодо *охорони та збереження навколишнього природного середовища*, забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення та безпеки прилеглих об'єктів техногенного середовища в тому числі в частині шуму, вібрації, інфразвуку і низькочастотного шуму в приміщеннях житлових і цивільних будинків та на території, що прилягає до будівельного майданчика, водовідведення із території виконання робіт, захисту оточуючої забудови від пилу, вивезення відходів та інше [8].

Рішення щодо *охорони праці, виробничої санітарії та техніки безпеки* повинні

відповідати вимогам правилам техніки безпеки згідно чинного законодавства.

В ПВР повинні бути позначені небезпечні зони переміщення вантажів, сусідні будинки або споруди, повітряні лінії електропередач, місця розміщення санітарно - побутових приміщень, автомобільних та пішохідних шляхів, тощо.

При організації робочих місць повинні бути вирішені питання їх забезпечення засобами колективного захисту та іншим інвентарем. Забороняється одночасний демонтаж і розбирання конструкцій в двох і більше ярусах по одній вертикалі. Знаходження людей на поверхах, нижче на захватці, де робиться демонтаж або розбирання конструкцій, забороняється.

Розбирання будівель (демонтаж конструкцій) необхідно здійснювати послідовно зверху вниз захватками. Забороняється розбирання будівель одночасно в декількох ярусах по одній вертикалі.

*Рециклінг демонтованих конструкцій.* Сучасні екологічні вимоги ставлять перед будівельниками завдання максимально повно використовувати, переробляти або утилізувати продукти розбирання будівельних конструкцій споруд. В Україні встановлено правове, організаційне та економічне підґрунтя для переробки будівельного сміття.

Під переробкою будівельних відходів (рециклінгом) розуміють дроблення і переробку бетонних конструкцій та іншого твердого будівельного сміття з метою отримання вторинної сировини, яку можна знову повернути у виробничий цикл і успішно повторно використовувати в будівельних роботах. У процесі рециклінгу відходів будівельного виробництва відбувається вилучення з бетонних фракцій фрагментів металеві арматури і подальше подрібнення бетону аж до отримання вторинної щебеню необхідного розміру.

Для проведення всього комплексу робіт по рециклінгу матеріалів і переробки будівельних відходів застосовується спеціальне, у тому числі і мобільне обладнання, таке як дробильна установка, гідромолот і багато іншого. Ефективність застосування саме мобільного дробильного обладнання обумовлюється тим, що в такому випадку рециклінг матеріалів можна проводити безпосередньо на місці демонтажу.

Варто відзначити, що в Європі, наприклад, одним з обов'язкових умов проведення демонтажу або знесення будівлі або споруди, є надання юридично оформленої інформації про те, коли і яка фірма буде робити утилізацію і переробку будівельних матеріалів [9, 10].

#### **Висновки:**

В статті викладено основні організаційно-технологічні особливості виконання демонтажу конструкцій панельних будинків.

В Україні станом на березень 2023 року внаслідок військових дій, було пошкоджено або зруйновано до 10% житлового фонду крупнопанельних житлових будинків.

Складовим процесом відбудови втраченого житла є демонтажні роботи.

Механізований процес розбирання будівельних конструкцій, після руйнування лише в'язевих і кріпильних елементів, називають демонтажем конструкцій.

На ефективність виконання цих робіт впливає ряд організаційних та технологічних факторів. До організаційних особливостей виконання демонтажних робіт відноситься:

- отримання вихідних даних, в тому числі звіту щодо обстеження будинку;
- прийняття рішення щодо виконання демонтажних робіт;
- розробка проектної документації;
- формування переліку підготовчих робіт та інше.

Технологія виконання робіт залежить від виду конструкції, яка демонтується. В статті наведено типові технологічні рішення для найбільш поширених типів конструкцій. Запропонована технологія базується на досвіді демонтажних та відновлювальних робіт за наслідками вибухів побутового газу та оперативно вдосконалюється з врахуванням особливостей робіт у військовий час.

На законодавчому рівні в Україні значно спростили виконання демонтажних робіт в частині дозвільної документації, але нормативно-законодавча база щодо відновлення, знесення та демонтажу вимагає доопрацювання з точки зору оптимізації і спрощення процедурних питань, у тому числі врахування реалій залучення до цих процесів іноземних благодійних інвесторів та необхідності оптимізації оподаткування таких робіт в умовах військового часу.

Питання вивчення ефективності виконання робіт достатньо широко висвітлено в працях вітчизняних та закордонних вчених, проте в Україні не достатньо вивчено питання повторного використання демонтованих конструкцій. Саме ресайклінг є перспективною темою подальшого дослідження напрямку ефективності виконання демонтажу крупнопанельних будинків.

### Література

1. Григоровський П.Є., Броневицький А.П., Мурасьова О.В., Григоровський А.П. Аналіз світового досвіду та сучасних технічних рішень будівництва швидко споруджуваних житлових будинків. *Нові технології в будівництві*. 2022. № 41. С. 10-20.
2. На листопад 2022 року загальна сума збитків, завдана інфраструктурі України, складає майже \$136 млрд. Київська школа економіки. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/na-listopad-2022-roku-zagalna-suma-zbitkiv-zavdana-infrastrukturi-ukrayini-skladaye-mayzhe-136-mlrd/> (дата звернення: 06.03.2023).
3. Ушацький С.А. Організація зведення і реконструкції будівель та споруд : навчальний посібник. Київ : Вища школа, 1992. 183 с.
4. Григоровський П.Є., Чуканова Н.П., Мурасьова О.В. Аналіз факторів, що впливають на термін життя будівлі в процесі експлуатації. *Нові технології в будівництві*. 2018. №2. С. 75-82.
5. Про затвердження Порядку виконання робіт з демонтажу об'єктів, пошкоджених або зруйнованих внаслідок надзвичайних ситуацій, воєнних дій або терористичних актів : Постанова Кабінету Міністрів України від 19.04.2022 №474. Урядовий кур'єр. 2022. 23 квітня. (№94). С. 1.
6. Савйовський В.В. Реконструкція будівель та споруд : навчальний посібник. Харків : Основа, 1997. 320 с.
7. Шатов С.В. Формування організаційно-технологічних рішень розбирання руйнувань будівель в особливих умовах : дисертація д-ра техн. наук : 05.23.08, ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури". Дніпро, 2014. 370 с.
8. ДБН А.3.1-5:2016. Організація будівельного виробництва. [Чинний від 2016-05-05]. Київ: Міністерство регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства України, 2016. 60 с. (Державні будівельні норми України).
9. Шпакова Г.В. Литвиненко О.В. Утилізація і переробка відходів будівництва: проблеми і перспективи. *Містобудування та територіальне планування*. 2011. № 41. С. 468-473.
10. EU Construction and Demolition Waste Management Protocol. European Commission. 2016. 52 p. URL: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/20509/> (дата звернення: 05.03.2023).

### References

- [1] P.E. Grigorovskiy, A.P. Bronevitskiy, O.V. Murasyova, A.P. Grigorovskiy, "Analiz svitovogo dosvidu ta suchasnihih tekhnichnih rishen' budivnictva shвидко sporudzhuvanih zhitlovih budinkiv", *Novi tekhnologii v budivnictvi*, no. 41, pp. 10-20, 2022.
- [2] Na listopad 2022 roku zagalna suma zbitkiv, zavdana infrastrukturi Ukrayini, skladaye majzhe \$136 mlrd. Kiyivska shkola ekonomiki. [Online]. Available: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/na-listopad-2022-roku-zagalna-suma-zbitkiv-zavdana-infrastrukturi-ukrayini-skladaye-mayzhe-136-mlrd/> Accessed on: March 06, 2023.
- [3] S.A. Ushatsky, *Organizaciya zvedennya i rekonstrukciyi budivel ta sporud*. Navchalnij posibnik. Kiyiv : Visha shkola, 1992.
- [4] N.P. Grigorovskiy, O.V. Chukanova, O.V. Murasova, "Analiz faktoriv, sho vplivayut na termin zhittya budivli v procesi ekspluataciyi", *Novi tehnologiyi v budivnictvi: naukovotekhnichnij zhurnal*, no. 2, pp. 75-82, 2018.
- [5] Pro zatverdzhennya Poryadku vikonannya robit z demontazhu ob'yektiv, poshkodzhениh abo zrujnovanih vnaslidok nadzvichajnih situacij, voyennih dij abo teroristichnih aktiv : Postanova Kabinetu Ministriv Ukrayini vid 19.04.2022 no. 474, Uryadovij kur'yer no. 94, 2022.
- [6] V.V. Savjovskij, *Rekonstrukciya budivel ta sporud*. Navchalnij posibnik. Harkiv: Osнова, 1997.

- [7] S.V. Shatov, "Formuvannya organizacijno-tehnologichnih rishen rozbirannya rujnuvan budivel v osoblivih umovah", disertaciya d-ra tehn. nauk : 05.23.08, DVNZ "Pridniprovska derzhavna akademiya budivnictva ta arhitekturi", Dnipro, 2014.
- [8] DBN A.3.1-5:2016. Organizaciya budivelnogo virobництва. Ministerstvo regionalnogo rozvitku budivnictva ta zhitlovo-komunalnogo gospodarstva Ukrayini. Kiyiv, 2016.
- [9] G.V. Shpakova, O.V. Litvinenko, "Utilizaciya i pererobka vidhodiv budivnictva: problemi i perspektivi", *Mistobuduvannya ta teritorialne planuvannya*, no. 41, pp. 468-473, 2011.
- [10] EU Construction and Demolition Waste Management Protocol. European Commission. 2016. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/20509/> Accessed on: March 05, 2023.

## ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF DISMANTLING STRUCTURES OF DAMAGED LARGE-PANEL BUILDINGS

<sup>1</sup>**Grigorovskiy A.P.**, candidate of sciences, a.grigorovski@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0009-2358

<sup>1</sup>**Bronevytskyi A.P.**, PhD, andbron.gm@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4841-622X

<sup>1</sup>SE«*Research Institute of Construction Production*»  
51 Valery Lobanovskiy Avenue, Kyiv, 03037, Ukraine

**Abstract.** During the last year, as a result of military actions caused by the aggression of the Russian Federation, about 17.5 thousand multi-apartment residential buildings were destroyed or damaged in Ukraine. This corresponds to 10% of the total number of apartment buildings in Ukraine.

The vast majority of destroyed multi-apartment buildings are of the panel type. Damaged housing must be rebuilt or repaired. During the execution of these works, a component stage is the dismantling of destroyed structures.

The article describes the main organizational and technological features of the dismantling of panel building structures. Systematized permit and project documentation, on the basis of which works are performed. Analyzed domestic legislation in terms of dismantling works.

The main stages of dismantling the structures of panel buildings are given. Peculiarities of performance of work and technology are indicated for each type of construction. The list of the main material and technical support for the performance of works is outlined on the example of a typical large-panel residential building. The article also provides a list of the main current requirements for safety, occupational health and environmental performance of works.

The scientific works of domestic and foreign scientists on this direction of building science research are analyzed.

In view of the significant amount of destroyed housing, Ukraine has adopted a number of legislative acts that deregulate the process of dismantling buildings and individual structures. The local self-government is responsible for deciding whether it is appropriate to dismantle this or that building. Responsibility for the proper preparation of project documentation and execution of works in accordance with the requirements of current legislation rests with the executor of the works.

The regulatory and legislative framework for restoration, demolition and dismantling requires revision from the point of view of optimization and simplification of procedural issues, including taking into account the realities of involving foreign charitable investors in these processes and the need to optimize the taxation of such works in wartime conditions.

The proposed technology is based on the experience of dismantling and restoration work following the consequences of domestic gas explosions and is quickly improved taking into account the specifics of work in wartime and during other emergency situations.

**Keywords:** reconstruction, rebuilding, large-panel buildings, dismantlement, organization, technology of construction.

Стаття надійшла до редакції 14.03.2023

---

## 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 № 3  
березень 2023**

Головний редактор *Вировой В.М.*

Технічний редактор *Антонюк Н.Р.*

Підписано до друку 04.04.2023 р.  
Формат 60×84/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.  
Цифровий друк. Ум.-друк. арк. 14,4.  
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