

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 № 6
грудень 2023**

ОДЕСА 2023

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

Випуск № 6, грудень 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 № 4 від 30.11.2023 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 № 6
December 2023**

ODESSA 2023

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

Issue № 6, December 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 № 4, 30 November, 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. Просторово-функціональні підходи до сучасної трансформації інтернатів доби модернізму.....	9
Данилов С.М., Чечельницький С.Г., Ізбаш А.М. Роль криз у процесах функціонування та розвитку міста.....	17
Деркач С.І. Тенденції та перспективи модернізації багатоповерхових житлових будинків на засадах сталого розвитку.....	26
Морозова Т.Т. Типологія та вплив кризових періодів часу на розвиток житлової забудови у сучасних містах.....	35

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

Кархут І.І., Лучко Й.Й. Дослідження несучої здатності конструкцій тривалої експлуатації колишнього заводу «Модуль» у м. Ужгороді.....	44
Михалевський Н.А., Вегера П.І., Бліхарський З.Я. Аналіз впливу нерівномірних пошкоджень залізобетонної балки з використанням програмного комплексу FEMAP.....	54
Неутов С.П., Єсванджия В.Ю. Експериментальне дослідження пошкодженої балки, посиленої фібробетоном.....	62
Човнюк Ю.В., Чередніченко П.П., Шудра Н.С., Козупиця С.І. Аналіз динаміки та оптимізація перехідних режимів руху вантажопідійомних механізмів мостових/містобудівельних кранів.....	69

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

Барабаш І.В., Пірогов Д.О. Активация цементу і її вплив на структуроутворення цементовміщуючих композицій.....	82
Колесников А.В., Семенова С.В., Маковецька О.О. Моделювання процесів структуроутворення композитів методами теорії катастроф.....	90
Кровяков С.О., Шестакова Л.Є. Вплив базальтової фібри і суперпластифікатору на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів.....	99
Сердюк В.Р., Христич О.В. Вплив протиожеледних речовин на водостійкість асфальтобетону в умовах циклів заморозування-відтавання.....	109

ГІДРОТЕХНІЧНЕ ТА ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Хонелія Н.Н., Лопатін К.О.

Результати теоретичних досліджень щодо визначення експлуатаційних навантажень на причальні споруди гравітаційного типу..... 116

ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Руссий В.В., Бочевар К.І.

Моделювання показників ефективності зведення будівель з використанням незнімної опалубки..... 123

Вимоги до оформлення статей у збірнику Сучасне будівництво та архітектура..... 133

CONTENTS

ARCHITECTURE

Babych O.M. Spatial-functional approaches to current transformation of boarding schools at the age of modernism.....	9
Danylov S.M., Chechelnytskyi S.G., Izbash A.M. The role of crises in the city's functioning and development processes.....	17
Derkach S.I. Trends and prospects of modernisation of multi-story residential buildings on the basis of sustainable development.....	26
Morozova T.T. Typology and influence of crisis periods on the development of residential buildings in modern cities.....	35

BUILDING STRUCTURES

Karkhut I.I., Luchko J.J. Study of the load-bearing capacity of structures of long-term operation of the former "Module" plant in Uzhgorod.....	44
Mykhalevskiy N.A., Vegera P.I., Blikharskyy Z.Y. Analysis of the effect of uneven damage of reinforced concrete beam using the FEMAP software package.....	54
Neutov S.P., Yesvandzhyia V.Yu. Experimental studies of a damaged beam reinforced with fiber concrete.....	62
Chovnyuk Y., Cherednichenko P., Shudra N., Kozupitsa S. Analysis of dynamics and optimisation of transient motion modes of hoisting mechanisms of overhead urban cranes.....	69

BUILDING MATERIALS AND TECHNIQUES

Barabash I.V., Pirogov D.O. Activation of cement and its influence on structure formation of cement-containing compositions.....	82
Kolesnykov A.V., Semenova S.V., Makovetska O.O. Simulation of composites structure formation processes using the methods of the catastrophe theory.....	90
Kroviakov S.O., Shestakova L.E. The influence of basalt fiber and superplasticizer on the strength of concrete for rigid pavements.....	99
Serdyuk V.R., Khrystych O.B. Effect of deicing agents on the water stability of asphalt concrete under freeze-thaw cycles...	109

HYDROTECHNICAL AND TRANSPORT CONSTRUCTION

Khoneliia N.N., Lopatin K.O.

The results of theoretical studies for determining of operational loads on berthing structures..... 116

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF BUILDING PRODUCTION

Russyi V.V., Bochevar K.I.

Modeling performance indicators of building construction using non-removable formwork.... 123

Requirements for the articles formation in collection Modern construction and architecture 133

**SPATIAL-FUNCTIONAL APPROACHES TO CURRENT TRANSFORMATION
OF BOARDING SCHOOLS AT THE AGE OF MODERNISM**

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

Abstract. The article presents a number of possible approaches for the spatial and functional transformation of boarding facilities built in the era of modernism within the framework of Soviet standard construction. The main goal of this work was to create a theoretical basis for the gradual process of transformation of the existing material base of care for children deprived of parental care within the framework of the "de-institutionalization" strategy, which, in turn, is based on the privileging of family-type collectives.

In the sense of the architectural strategy, the process of transformation of "institutionalized" institutions of the traditional planning and spatial structure based on the functionalist-rationalist method of design into "deinstitutionalized" institutions with the allocation of several zones for the family-type team is considered. It is assumed, that this method of achieving the goals of deinstitutionalization is only one of the possible ways related to the situation when the old premises of social care will cease to perform their functions in the traditional mode and the question of their new further use will arise. In addition, it was suggested that due to the presence of a certain number of residential facilities built on the basis of so-called standard projects, it may be possible to talk about the creation of "standard" recommendations based on them, which, to a certain extent, will simplify and reduce the cost of the process of reorientation of social care institutions about children deprived of parental care in the format of a family group.

Four transformative principles have been outlined that will allow the process of refurbishing old modernist facilities, mostly built during the Soviet period, in accordance with the principles of the deinstitutionalization strategy adopted in Ukraine as the basis of the state treatment program for children in need of social care. They cover a complex of spheres, in particular, such as the positive constitution of the child's personality, his effective socialization, constant energy efficiency, etc.

Keywords: deinstitutionalization, conversion, typical design, modernist objects, family-type institutions.

Introduction. Modern advances in the study of the psychology of orphans' growth have provided convincing information about the ineffectiveness of traditional boarding schools and the methods of education on which they were based [1]. The main reasons here are the lack of long-term personalized contact and emotional connection, which are characteristic of a family team. In this regard, in 2017, Ukraine adopted the National Strategy for Reforming the Sphere of Child Care. Who are deprived of parental care [2]. In particular, it provides for the gradual elimination of traditional boarding schools and a shift in attention towards adoption, or education in small "family-type" groups, in which the negative features of the "institutionalized" institution will be minimized.

In the latter case, the question arises of the need to develop a new type of space, the structure of which reflects fundamentally new educational methods and ways of interaction between the guardian and children. In this context, old residential institutions are losing their functional necessity, and their further use requires significant rethinking. Despite this, many of the qualities of such facilities may remain relevant and important for the field of alternative care, such as sports infrastructure, food and leisure areas. The supposed decrease in the number of children does not mean that objects of the "institutionalized" type cannot be used for their original purpose. A

possible way of their further existence is a planning and spatial transformation for the needs of several groups of the "family" type, which, on the one hand, living in a relatively isolated environment, could provide a sufficient level of personalized attention to each child, and on the other hand, use the existing infrastructure, within the framework of joint activities with representatives of other "family" groups-neighbors.

Under these circumstances, there is also a potential opportunity to develop and implement methods of positive socialization in broader communication contexts, as well as within different age groups, which, if an effective methodology is used, will solve one of the main problems of interpreting children deprived of parental care – the feeling of increased danger from the environment and social contacts.

Analysis of the main sources and publications. Given this topic's novelty, the study's source base is relatively insignificant. At the same time, it is worth noting the growing interest in the processes of deinstitutionalization and its comparison with other countries. An example is B. Lof's article "The Rise and Fall of Orphanages in Ukraine", where the author compares the process of disappearance of traditional institutions for children deprived of parental care in Ukraine and the United States [3]. This topic is further developed in the article by L. Kravchuk "Transformation of social services in Ukraine: deinstitutionalization and reform of the system of institutional care for children" [4]. A similar study of the processes of deinstitutionalization in Bulgaria is analyzed in the article by S. Page "Deinstitutionalization of Bulgarian Orphanages: A Study of Guardians' Discourses on Changing Reforms" [5]; in Romania in a study by F. Greenwell [6]. Various ways of forming the space of "family" on the basis of existing structures are considered in the article by L. Gnes "Architectural and Planning Organization of Family-Type Children's Homes" [7]. Among the domestic researchers of this topic, it is worth noting the works of V. Abyzov and O. Voloshchenko [8], N. Miroshnikov and Y. Doroshenko [9], Z. Obitochnaya [10] and others [11, 12].

Works on the problems of deinstitutionalization in African countries, such as Rwanda [13] or Egypt [14], may also be of some interest.

The purpose of the article is to outline practical approaches to the deinstitutionalization transformation of boarding schools in the era of modernism.

Research objectives: 1) to identify the main functional problems of modernist boarding schools in terms of their compliance with the methodology of "family" interpretation of children deprived of parental care; 2) to outline the spatial and functional techniques with the help of which it becomes possible to use residential buildings of the modernist era within the framework of the deinstitutionalization strategy.

Materials and methods of research. The materials for this study are samples of modernist boarding school buildings in Ukraine, mainly from the times of Soviet standard design. In particular, objects in three regions – Lviv, Kyiv and Odesa regions – were examined, the architecture of which largely reproduced the principles of the construction of typical secondary education institutions. Another important element of the study was the study of methods of positive growth, in particular, the axiological constitution of a personality oriented towards formation of a developed and harmonious "self-image" [15]. The combination of the results of research on the existing material base and the theoretical foundations of the axiogenesis of personality has become the main methodological basis for this work.

Statement of the main material. Modernist projects of boarding schools by their specificity relate to buildings designed for the simultaneous stay of a significant number of pupils and educators. The functional scheme was fixed and did not provide for the prospect of one or another transformation or readjustment for various purposes. Usually, large facilities, such as dining and kitchen blocks or sports facilities did not have the ability to expand the program of use. In this context, as the first and most obvious step, it is possible to admit a strategy of reorganization of such in the form of transformation of specialized institutions into an ordinary secondary school, but integrating a family-type boarding school with it. At least for especially elementary school students. This approach can help increase the level of social inclusiveness and create conditions for positive interaction between children with different communicative and structural characteristics.

At the same time, this approach should be perceived only as one of the possible ways of interpreting modernist boarding school buildings. The broader potential is due to the complex transformation of the structure, which is interpreted as a conglomerate of environments to accommodate several "families". Under these circumstances, there is a need for a more detailed rethinking of the functional statics of the planning structure, which must turn into a space capable of transformation and adaptation. The axiological constitution of the individual, the main task of which is to erase the difference between children deprived of parental care and their peers from ordinary families, requires close cooperation between planners and designers and developers of positive growth methods used in one case or another. However, on the basis of the analyzed material, we can say that the main factor here is the construction of effective communication connected, on the one hand, with the individual connection of the child with the educator who finds himself in the parental role, and on the other hand, gaining experience of friendly interaction with different age and target groups. In fact, the architectural interpretation of modernist objects boils down to adapting the abstract structure of the materialization of the communicative network in the conditions of the initially functionally determined spaces of the "institutional" institution.

With proper support and supervision from caregivers and responsible individuals, large institutional complexes can be used as flexible systems that integrate alternative and standard approaches to child care. This opens up wide opportunities for improving parenting methods and contributes to the positive development of children in such conditions. The provision of space for mixed use can be heterogeneous and not limited solely to educational functions.

In the case of middle-aged and older children, it is also important to consider the possibility of combining the care space with certain forms of production or business activity, as long as this is in the child's safety and best interests. Such forms of activity can be coworking centers, farms, information technology enterprises, art studios, and many others. In addition, it is important to consider improving cooperation with various religious and charitable organizations, which can also be integrated into care spaces. In such conditions, pupils of family-type boarding schools (from middle age to senior) will have the opportunity to develop valuable skills that will be useful to them after leaving the care facility, through active participation in various activities.

Taking into account the goals of the deinstitutionalization strategy, a promising direction is the development of methods and techniques that will allow the mutual stay of children from ordinary families and those in need of alternative care. Objects of modernist architecture are much more suitable for adaptation to ordinary secondary schools than family-type institutions, which opens up the possibility of combining these two functions and creating prerequisites for positive socialization. In such cases, the transformative volumes are smaller, but the space for the stay of "family" teams is also reduced. Therefore, such a structure is likely to accommodate no more than two or three families, which, in terms of education and extracurricular leisure, will be fully integrated into the traditional school system. At the same time, the difference in the length of stay in the same room will require measures to "equalize" the possibilities of choice, in order to avoid the feeling of inequality between the two children's groups.

This problem can be solved by expanding the functional interpretation of the environment, and forming activities that will be perceived as desirable for both categories of students. In addition, the concept of a wider integration of "family" educational environments into the environment is probably also promising. Often, modernist boarding schools were located surrounded by residential areas, the infrastructure of which has developed significantly over the past few decades. With this in mind, new "family" groups may have additional methods of positive socialization, such as the use of children's areas and playgrounds for playing with children from ordinary families, participation in the life of the local community, religious community, etc. Therefore, the integration of "families" into a wider circle of communication will gradually take place, overcoming hostility and a sense of danger from the environment through their own experience of positive communication with neighborhood groups. The above-mentioned direction of transformation also makes it possible to talk about expanding the potential for full-fledged adoption, which is based on more intensive contacts with various social groups, including those among which there are the most likely

candidates for parenthood.

When considering the strategy of mixed use of modernist institutional objects, it is important to take into account the combination of the methodology of increasing social involvement with the methodology of generational education. From the point of view of the organizational structure, this means the creation of several family teams within such an institution, where everyone has their own mentor and their own space for joint communication. However, along with joint activities, they also have the opportunity to interact with each other, transferring some educational tasks to older generations. Thus, an environment is created where several communicative groups have a single, albeit complex, system of adaptive ties.

The architectural transformation of an institutional boarding school, the style of which belongs to the modernist direction, in this context, includes a change in the system of corridors to a structure of visually separated spaces designed to serve each communication center separately (Fig. 1 and Fig. 2, Fig.3). Since many of these buildings are designed according to standard schemes, it is possible to develop a general strategy for their reconstruction based on the typical features of their planning structure. For example, the space required for alternative family care can be arranged in the end parts of the enclosures. This creates an opportunity for additional visual separation both inside and outside the building, as it becomes possible to place separate entrances and small adjacent territories intended exclusively for one "family".



Fig. 1. The plan of the educational complex for 175-200 children was developed by the Ministry of Regional Development



Fig. 2. The plan for a kindergarten with 35 to 45 places was developed by the Ministry of Regional Development



Fig. 3. The plan for a kindergarten with 45 to 60 places was developed by the Ministry of Regional Development

With such an arrangement of modernist buildings, when several small micro-groups of children and educators are in this place, meals can take place both inside an isolated space (for example, breakfast) and in common areas used by all groups (for example, lunch).

The planning and island transformation, which is considered here, should not be perceived as complete and final, but should have the potential for constant change. In this sense, the intended structure can acquire a metabolic character, when the completeness of the architectural image does not imply the completeness of the functional interpretation. It can be assumed that the reconstruction of the frozen functionalism of the modernist construction will lead to a long morphological metamorphosis, which on the scale of a longer time will significantly change the

architectural appearance of the building, in which, however, different layers of collective and individual memory of different generations of pupils will be preserved. These layers, in turn, will create a sense of "depth in time" where each successive generation will see evidence of the positive experience of their predecessors. In this case, the institution, which operates in the form of a kind of "chronotope", will constantly increase its adaptive and educational effectiveness over time.

Due to the design features that were typical for the Soviet period, when reorganizing institutional modernist complexes, it is important to focus on the introduction of new strategies of independence and energy efficiency. Considering the financial aspect of operating such institutions (whether at the expense of the state budget or through private funds), the sustainability program should be based on achieving maximum autonomy in the management of the institution. This can be achieved through the use of active and passive means for energy self-sufficiency.

Familiarization with and management of these tools can also play an important role in the process of teaching children ecology, contributing to their acquisition of both theoretical and practical knowledge about environmental conservation and the promotion of a nature-friendly attitude. In addition, from a pedagogical point of view, the values of self-sufficiency that are associated with engaging this kind of strategy will help overcome feelings of vulnerability and overdependence on social conventions. In the future, it is worth talking about the involvement of more in-depth educational programs that promote the principles of sustainability and self-sufficiency, primarily through innovative methods of teaching technological and physical aspects, the creation of experimental experiences with their own involvement in the creation of sustainable practices and energy-efficient devices.

Taking into account the above analysis, it is possible to formulate the following principles of deinstitutionalization transformation of existing objects of modernist architecture (mainly of the Soviet period of construction):

a) Internal fragmentation: the division of the common space into several isolated zones for the residence of individual family groups. This principle will make it possible to use the dead-end and end sections of modernist complexes as separate environments, for family groups with a sufficient degree of isolation and a balance of separation and cooperation. This approach contributes to the creation of efficient and functional spaces where each family team can benefit from their own privacy, while ensuring a high degree of isolation and a balance between individualized and collective activities. This concept opens up new possibilities for organizing spaces where different family groups can coexist, providing an improved living environment for each of them. Architectural design opens up the potential for deconstructing an overly rationalized living environment, which involves the introduction of elements of surprise and irrationalism, and helps to overcome the monotony of everyday life. This process expands the possibilities and depth of architectural solutions, allowing for the creation of expressive and unique spaces that go beyond the ordinary and bring a new level of individuality to the environment. Architects, applying this approach, can enrich the space with unexpected details, breaking stereotypes and promoting the development of creative thinking in rebuilding the world around them.

b) Micro-collective isolation: the physical separation of family groups, both within the premises and in the surrounding areas. It provides an opportunity to expand the potential of the previous principle, including through the use of separate adjacent plots, the existence of which was inherent in the modernist planning of boarding schools. In the context of micro-collective isolation, the physical separation of family groups is considered, both within buildings and in surrounding areas. They typically have uniform geometric contours with a leveled patch of land that can be reconfigured into a more demanding and diverse landscape environment, while taking into account various aspects of the natural environment, such as vegetation, topography, and water features. This transformative opportunity allows for the creation of attractive and functional spaces that adapt to the changing needs and aesthetic requirements of users, and influence the overall character of the urban landscape, creating a more harmonious and environmentally balanced environment.

c) Inclusive synergies: creating shared environments outside of isolated groups based on the use of available spaces for different purposes, such as courtyards, canteens, gyms and the

surrounding area. This principle involves the use of collaborative spaces for the implementation of positive socialization techniques, which is one of the key goals of treating children deprived of parental care. The potential of this direction is associated with the tradition of building large sports and food blocks, which often exceed the existing need, due to a decrease in the number of students. This provides additional opportunities for transforming and supplementing collaborative environments, giving them more flexible and adaptive functionality. Reducing the number of students in educational institutions, while at the same time being highly efficient, also contributes to lower energy consumption and creates more comfortable and environmentally friendly spaces for learning and socializing

d) Sustainable energy efficiency: focus on achieving maximum self-sufficiency of the system for meeting the vital needs of the complex. Here we are talking about a set of measures to transform energy-consuming premises designed for the uncontrolled use of exhaustible resources, into a self-sufficient and sustainable structure, maximally provided with its own renewable sources, which will make it possible to reduce the cost of maintenance. The use of energy-saving technologies and practices in such institutions can lead to significant economic benefits that will be used to improve the quality of life and provide additional resources for children's development. Appropriate use of energy also contributes to the reduction of emissions and has a positive impact on the ecological state of the environment, creating a healthy and safe place to grow and learn.

In connection with the specifics of Soviet modernism, which was based on typical design, it is also worth talking about the prospect of typological optimization: the use of general architectural solutions for the development of unified methods of deinstitutionalization transformation of boarding schools of the modernist style. This approach is aimed at reducing the costs of the transformation process and may require separate theoretical and practical efforts, and in some cases, even ignorance.

In the future, this topic can be developed in the direction of studying the potential of differentiation of different ages, which is associated with: a) special methods of growth, which are designed to involve older children in the upbringing of younger ones, as well as to gain experience of socialization in more complex groups; b) studying the possibility of transforming the former boarding school into a comprehensive school with partial residence of "families" of children deprived of parental care with educators.

Conclusions:

1. The following principles of deinstitutionalization transformation of existing objects of modernist architecture are formulated: The principle of internal fragmentation: the division of the common space into several isolated zones for the residence of individual family groups. This principle will make it possible to use the dead-end and end sections of modernist complexes as separate environments, for family groups with a sufficient degree of isolation and a balance of separation and cooperation. The principle of micro-collective isolation: the physical separation of family groups, both within the premises and in the surrounding areas. It provides an opportunity to expand the potential of the previous principle, including through the use of separate adjacent plots, the existence of which was inherent in the modernist planning of boarding schools. The principle of inclusive synergy: the creation of shared environments outside of isolated groups based on the use of existing spaces for different purposes, such as courtyards, dining rooms, gymnasiums and the surrounding area. This principle involves the use of collaborative spaces for the implementation of positive socialization techniques, which is one of the key goals of treating children deprived of parental care. The principle of sustainable energy efficiency: the focus on achieving maximum self-sufficiency of the system for meeting the vital needs of the complex. Here we are talking about a set of measures to transform energy-consuming premises designed for the uncontrolled use of exhaustible resources, into a self-sufficient and sustainable structure, maximally provided with its own renewable sources, which will make it possible to reduce the cost of maintenance.

2. The range of possible further research on this topic is outlined, in particular: the prospect of typological optimization: the use of general architectural solutions for the development of unified

methods of deinstitutionalization transformation of boarding schools of the modernist style – this approach is aimed at reducing the costs of the transformation process and may require separate theoretical and practical efforts, and in some cases, even ignorance; search for spatial expression of special methods of growth, which are designed to involve older children in the upbringing of younger ones, as well as to gain experience of socialization in more complex groups; study of design solutions for the possibility of transforming a former boarding school into a secondary school with partial residence of "families" of children deprived of parental care with educators.

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] Pro Natsionalnu stratehiiu reformuvannia systemy instytutsiinoho dohliadu ta vykhovannia ditei na 2017-2026 roky ta plan zakhodiv z realizatsii yii I etapu. Kabinet Ministriv Ukrainy, Rozporiadzhennia vid 9 serpnia 2017 r. № 526-r. Kyiv, 2017. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/526-2017-%D1%80#Text>. Accessed on: September 10, 2022.
- [3] B. Lough, "Rise and demise of orphanages in Ukraine", *European Journal of Social Work*, 6(1), pp. 49-63, 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01369145032000099648>. Accessed on: September 15, 2023.
- [4] L. Kryvachuk, "Transformation of Social Services in Ukraine: the Deinstitutionalisation and Reform of the Institutional Care System for Children", *Labor et Educatio*, 2018, pp. 129-148.
- [5] S. Page, *Deinstitutionalisation of Bulgarian Orphanages: Examining Caregiver Discourses on the Changing Reforms*, 2018.
- [6] F. Greenwell, "The impact of child welfare reform on child abandonment and deinstitutionalisation", *In Annales de démographie historique*, no. 1, pp. 133-157, 2006.
- [7] L. Hnes, "Arkhitekturno-planovalna orhanizatsiia dytiachykh budynkiv simeinoho typu", *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia*", no. 24, pp. 312-321, 2010. [Online]. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Spam_2010_24_46. Accessed on: September 9, 2023.
- [8] V. Abyzov, O. Voloshchenko, "Formuvannia predmetno-prostorovoho seredovyshcha dytiachykh pryutkiv", *Aktualni problemy suchasnoho dyzainu, Zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, no. 2, pp. 112-115, 2018.
- [9] N. Myroshnikova, Yu. Doroshenko, "Budynky vykhovannia ditei-syrit: retrospektyva ta typolohiia zakladiv", *Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu budivnytstva i arkhitektury*, no. 38, pp. 445-451, 2015.
- [10] Z. Obitochna, "Functional and planning organization of the center for joint temporary stay of the elderly and orphans", *Modern problems of architecture and urban planning*, no. 62, pp. 292-303, 2022.
- [11] 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.
- [12] A. Arkhaimova, "Pryntsypy arkhitekturno-planovalnykh rishen sotsialno-reabilitatsiinykh tsestriv (dlia bezprytulnykh ditei ta pidlitkiv)", avtoref. dis. cand. arkhit.: 18.00.02, Kyivskoho natsionalnoho universytetu budivnytstva i arkhitektury, Kyiv, 2005.
- [13] J. Hunsley, R. Crawley, E. Styffe, A. West, C. Call & C. "Hategekimana, Effectiveness of a traumainformed intervention in a deinstitutionalisation programme in rural Rwanda", *Child & Family Social Work*, no. 27(2), pp. 287-298, 2022.
- [14] A.H. Abdel Aziz, *Deinstitutionalisation and Alternative Care Systems: A Case Study of Children Without Parental Care in Egypt. Institutional Reforms, Governance, and Services Delivery in the Global South*, pp.75-99, 2022.

[15] Z.S. Karpenko, "Psykhologichni osnovy aksiogenezu osobystosti", dys. d-ra psykhol. nauk: 19.00.07, Prykarpatskyi un-t im. V. Stefanyka, Ivano-Frankivsk, 1999.

ПРОСТОРОВО-ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО СУЧАСНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ІНТЕРНАТІВ ДОБИ МОДЕРНІЗМУ

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

Анотація. У статті обґрунтовано ряд ймовірних підходів для просторово-функціональної трансформації інтернатних споруд, котрі були зведені у добу модернізму в рамках радянського типового будівництва. Головною метою даної роботи було створення теоретичної бази для поступового процесу трансформації існуючої матеріальної бази піклування про дітей позбавлених батьківської опіки в рамках стратегії «деінституціалізації», яка, у свою чергу, ґрунтується на привілеюванні колективів сімейного типу.

В сенсі архітектурної стратегії розглянуто процес трансформації «інституційованих» об'єктів традиційної планувально-просторової структури базованої на функціоналістично-раціоналістичному способі проектування у «деінституціалізовані» заклади із виділенням кількох зон для колективу сімейного типу. Передбачається, що цей спосіб досягнення цілей деінституціалізації є лише одним із можливих шляхів, пов'язаних із ситуацією, коли старі приміщення соціальної опіки перестануть виконувати свої функції у традиційному режимі і постане питання про їх нове подальше використання. Крім того, висловлено припущення, що через наявність певної кількості інтернатних об'єктів збудованих на основі так званих типових проектів, може іти мова про створення на їх основі «типових» рекомендацій, які, певною мірою, спростять і здешевлять процес переорієнтації закладів соціальної опіки про дітей позбавлених батьківського піклування на формат сімейного колективу.

Окреслено чотири трансформативних принципи, які дозволять здійснити процес переобладнання старих модерністських об'єктів, переважно зведених у радянський період, згідно засад деінституціалізаційної стратегії, яка прийнята в Україні за основу державної програми трактування дітей, що потребують соціальної опіки. Вони охоплюють собою комплекс сфер, зокрема таких як позитивне конституювання особистості дитини, її ефективна соціалізація, стала енергоефективність тощо.

Ключові слова: деінституціалізація, переобладнання, типове проектування, модерністські об'єкти, заклади сімейного типу.

Стаття надійшла до редакції 7.11.2023

THE ROLE OF CRISES IN THE CITY'S FUNCTIONING AND DEVELOPMENT PROCESSES

¹**Danylov S.M.**, Doctor of Architecture, Assistant Professor, serhii.danylov@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7647-4665

¹**Chechelnytskyi S.G.**, Doctor of Architecture, Professor, Serhii.Chechelnytskyi@kname.edu.ua, ORCID: 0009-0002-0247-9054

¹**Izbash A.M.**, Ph.D, Assistant Professor, andrii.izbash@kname.edu.ua, ORCID:0000-0002-3265-2383

¹*O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshal Bazhanov Street 17, 61002 Kharkiv, Ukraine*

Abstract. The article presents the systematization of crises events arising in the process of functioning and development of the city as a complex system with a large number of different components interacting in a dynamic manner. The city is analyzed as an object that consists of a multitude of systems and subsystems, whose life interests on one hand foster development and on the other, limit each other's growth. As they change under the pressure of external and internal factors, these elements encounter limitations imposed by adjacent systems, leading to conflicts in the life interests of the city's subsystems. In this case, the contradictions are necessary and inevitable conditions for the development of any system, providing its mutability under changing external conditions of existence. Practically, they act as the driving force of development, prompting the system to alter its properties. City risks losing its ability to adapt and becoming vulnerable to external influences and internal disturbances.

The study uses ideas taken from systems theory and synergetics, which allow for conclusions that the city as a system demonstrates a classic case of the "Law of Unity and Conflict of Opposites", where there is a constant balancing between the need to maximize self-preservation and survive in a changing world. On the other hand – the aspiration for changes, sometimes leading to crisis. These systemic contradictions can be resolved by sophisticated regulation or can be exacerbated by wrong decisions. This approach offers new horizons for urban planning, where every step should be deliberate and aimed at providing sustainable development, consolidation of the social structure and a higher quality of life for citizens. With this perspective, city governments can transform potential crises into opportunities for the development and modernization of urban environments.

Keywords: architecture, city, crisis, bifurcations, system.

Introduction. The study of crises as factors determining future scenarios and formats of the city's existence provides an opportunity to create a new map of scientific notions and research directions to guarantee its maximum "survivability". Consequently, when forecasting future development, it is necessary to consider possible scenarios and those crises that it can overcome.

In addressing the issues of crises in relation to urban functioning and development, it is noted that a crisis, in this aspect of its examination, signifies a change in the operational conditions of the city system, resulting in a loss of stability.

The origins of crises are recognized as an indicator of the city system transitioning to a new state through equilibrium disruption. Knowledge of the developmental trends of a crisis and the conditions where they evolve allows for the anticipation of the final result – either the city attaining a new state of equilibrium or moving towards a potential catastrophe.

A crisis as a "loss of stability" provides examples of how unpredictability sometimes triggers a cascade of large-scale events. For instance, the immediate cause of the Sepoy Mutiny of 1857-1859 "was the use of new rifles with cartridges in "cartouches", which soldiers had to bite off while

loading. These cartridges were greased with beef or pork fat, offending both Hindus, who revere cows as sacred, and Muslims, who are prohibited from consuming pork. This rebellion led to a prolonged bloody war, resulting in the dissolution of the East India Company's rule and the establishment of the British Indian Empire" [1].

A crisis is a period when something in the system changes. As internal disequilibrium intensifies, the system approaches a bifurcation point, where its evolutionary path diverges. At this juncture, the system becomes highly sensitive to external and internal forces. The choice of one or another path at the bifurcation point depends on the factor of chance. The development of such systems is fundamentally unpredictable.

Arnold Toynbee, for example, identified two bifurcation points in the development of the Hellenic world and analyzed in detail two possible scenarios for the development of events in the era of Alexander the Great. The first scenario envisages Alexander living in old age and creating a world empire from Rome to China. The second involves the unsuccessful assassination attempt on Philip II, Alexander's father, in 336 BC, leading to Alexander's death. Concurrently, an attempt to poison the Persian king Artaxerxes fails, resulting in the rivalry and collaboration between the Hellenic and Persian states becoming the main drivers of the 4th century BC [2].

Analysis of research and publications. In terms of analyzing publications on the research topic, the following points can be noted:

Authors V. Rao and D. Dogruer examines methods and strategies of design and planning that enhance cities more resilient to extreme events and crises [3].

The work "Crises Spaces. Structures, Struggles and Solidarity in Southern Europe" directed by Costis Hadjimichalis is of interest for presenting scientific insights on how urban architecture and space respond to various crises, including social and economic ones [4].

"Urban Disaster Management and Resilience" by S. Nazif [5], "Urban Resilience: A Transformative Approach" directed by Yoshiki Yamagata and Hiroshi Maruyama [6], "How can a municipal government continue operations during megadisasters? An analysis of preparedness using complex adaptive systems" by M. Haraguchi [7] presents theoretical frameworks for the recovery of cities post-crises and disasters with an emphasis on architecture and urban planning.

The work "New Urbanism: Past, Present and Future" by Ajay Garde examines how urban planning and architecture can adapt and respond to various types of crises, including pandemics and climate change [8].

The work "Urban Policy in Times of Crisis: The Policy Capacity of European Cities and the Role of Multi-Level Governance" edited by R. Cucca and C. Ranci explores the role of urban and regional planning in crisis management, such as natural disasters and economic crises [9].

It is important to highlight in this context the book "Architecture and Resilience: From Theory to Practice" by Michelle Laboy and David Fannon, which investigates how architectural design can contribute to the resilience of cities in the face of crises and disasters [10].

Purpose of the study: Identification and systematization of crises inherent to the operational and developmental processes of the city as a dynamic system.

Research Methods. The systematic approach in the study of crises in the functioning and development of urban architecture entails considering the city as a complex dynamic system composed of diverse components and the interconnections between them. This approach facilitates the creation of models and scenarios to predict the outcomes of various decisions and changes within this system [11].

Interdisciplinary approach. The study of crises affecting urban architectural development necessitates interdisciplinary collaboration among architects, engineers, environmentalists, economists, sociologists, and other specialists to fully comprehend the system and its challenges. This collaboration, in turn, will enable the development of strategies for managing changes within the system, taking into account the consequences of crises and potential risks of the city system losing its stable state.

The study also uses methods of synergetic, as a science studying complex systems and their evolution. This method is used in analyzing the development of the city and the bifurcation points

in its evolution in the context of crises. Synergetic helps in understanding how urban systems self-organize, adapt to changing conditions and how the city responds to various challenges. It allows us to identify the moments when the city system is on the brink of a state change, which may lead to new developmental trajectories [12].

Results of the study. Based on content analysis of publications available in the most widespread scientometric databases, a described and systematized hierarchical sequence of global crises has been compiled, which includes:

Demographic crisis. The population size does not correspond to the capacity of the occupied territory to provide the residents with the necessary resources for life. A prominent instance of demographic crisis is the Great Migration, which resulted in the capture and plundering of Rome by the Visigoths under King Alaric in 410 AD and the emergence of new states on the European continent during the medieval period.

Among modern architectural and urban planning examples, we can cite the works of P. Soleri, who sees the way out in the creation of buildings, collectively termed "arcology". The principle consists of the most efficient use of the earth's surface and compact settlement of people inside the building. In other words, if it is a problem for settlements to grow horizontally, the alternative is to grow vertically. The literal embodiment of this principle is the projects of skyscrapers whose height exceeds several kilometres. Such structures have been termed hyper-structures [13].

Agrarian crisis – relates to the inability to feed the population of a territory through existing agricultural resources. The main causes of this crisis can be excessively rapid population growth, crop failures, cold weather, or unsuccessful government policy. Throughout human history, hunger has been a threat to the existence and well-being not only of cities but also of entire countries.

It is known that in the 4th century BC, the Greek architect Deinocrates proposed to Alexander to make a statue of the king out of Mount Athos. On one hand, it would hold a city, and on the other – a cup, which was to collect water from mountain springs and pour it into the sea. Alexander liked the architect's proposal, but he declined to implement it, asking how Deinocrates intended to feed the ten thousand people who were supposed to live in this city.

A potential solution at the current stage of architectural development is the vertical farm. This concept promises the renewal of cities, sustainable production of safe and varied food (year-round production of agricultural crops), and ultimately the restoration of ecosystems that have been sacrificed for terrestrial agriculture.

Ecological crisis. Human economic activity has so altered the environment that these changes become a threat to the existence of humanity itself. An ecological crisis can also occur as a result of climate change and a series of natural disasters.

By the present time, several priority ecological directions have been identified and actively developed by scientists around the world: waste-free, non-destructive production technologies; complete utilization of all life-sustaining waste; use of renewable sources of raw materials and energy; transition from extensive to intensive development. In architecture, these directions have formed into the following concepts: bioclimatic architecture, intelligent or smart building, smart home system, high-tech building, healthy building, ecological, life-supporting building, and so on [14].

Energy and raw material crisis – solving the issue of cheap clean energy and raw materials is key to resolving most other crises. Currently, there are dozens of ghost towns on the planet, created near sources of raw materials and abandoned when these reservoirs were developed [15, 16].

The most famous is Hashima Island in Japan, located in the Sea of Japan, which became famous due to a crisis associated with its history and use during Japan's industrial development. The island was known for its underwater coal mines and residential apartment buildings. From 1887 to 1974, coal mines operated on the island. With the advent of cheaper and more efficient energy sources, and as the coal industry became obsolete, the mines on the island were closed. This led to a crisis, as workers were left unemployed and the island became deserted. Now it has become a popular subject of study and a tourist destination and its history has begun to be researched and documented. In 2015, Hashima Island was included in the UNESCO World Heritage List as part of

"Japan's Industrial Revolution's Golden Age".

A modern example of solving the energy crisis could be alternative energy in architecture. The energy of the sun, wind, water, earth, and biomass is already a real and affordable alternative to traditional fuel energy today. The main directions of building energy efficiency have become the principles of energy passivity and energy activity. The idea of energy-active and energy-passive buildings is the result of searching for the most economical means of energy supply for construction objects and implies achieving this goal thanks to the possibility of energy production directly at the site, promising the prospect of a complete refusal to set up expensive and unreliable in operation external engineering networks.

Economic crisis. This crisis is based on the changing nature of internal and external economic relations caused by the information and technological revolutions. As a result of the changes, many cities, oriented in the process of globalization of industries to produce a narrow range of products are losing sustainability and attractiveness for the most active and productive members of society to live in them.

A prominent example of the economic crisis impact on a metropolis is the city of Detroit, the former automotive capital of the world. After the withdrawal of many automotive productions from the USA to third-world countries, the central part of the city turned into a ghetto. The narrow specialization of cities on a certain type of product put them in an extremely dependent on external economic conditions position. Consequently, shifts in demand and alterations in external economic circumstances lead to the appearance of "ghost towns", settlements from which residents have left, having lost their main sources of income due to changes in the world market situation.

Cultural crisis. It is characterized by the deviation of most of the culture's components from their stable state. The cultural crisis was the cause of the destruction not only of individual cities but even entire civilizations such as ancient Babylon. In the Book of Prophet Jeremiah, ch. 51, v. 6 about Babylon is written as follows: "Flee from the midst of Babylon and save every man his soul; lest you perish in her iniquity, for this is the time of the Lord's vengeance, He is rendering her a recompense. Babylon was a golden cup in the Lord's hand that made all the earth drunk; the nations drank her wine; therefore, the nations are mad".

Social crisis. The problem of the disintegration of social connections within society, the loss of intra-group connections by many social groups becomes a problem that does not allow effectively solving the tasks of urban ecology. An interesting example of the power of social crisis impact on the state is ancient Sparta. For centuries, Spartan society was built as an aristocratic militarized state based on the oppression of the indigenous population – helots. Thanks to the discipline and excellent combat qualities of Spartan troops, Lacedaemon played a leading role in the politics of ancient Greece for a long time, but the static nature and unwillingness to change created social relations did not allow the Spartans to adapt to the changed external conditions.

Crises can also be systematized and analyzed according to the following characteristics:

Cause of occurrence. Natural crises are those caused by changes in the functioning of the environment that are not dependent on human actions. An example of this would be cities abandoned by inhabitants due to changes in river beds. For instance, Kanka – the first capital of the Tashkent oasis, was one of the largest urban centres in Uzbekistan during the antiquity and medieval periods, existing from the 3rd century BC to the 13th century AD [17].

Civilizational crisis. Such crises result from human activity. In Ancient Hellas, only a small part of the land was suitable for cultivation and crops. In order to get new territories for farming and orchards, forests covering the mountain slopes were cut down, and sheep and goats, which had long been bred by the Greeks, ate and trampled young tree shoots. By disturbing the natural balance, the Greeks faced droughts and famine.

Nature of manifestation. Predictable crises are those that occur as the next stage of system development, which can be forecasted and are caused by known reasons. Today, the imminent predictable crisis is the freshwater crisis. According to the UN, more than 1.2 billion people already live in conditions of constant freshwater shortage, and about 2 billion suffer from it regularly (in the dry season, etc.). According to FAO forecasts, by the middle of the third decade of the XXI century,

the number of people living under permanent water scarcity will exceed 4 billion people [18].

An example of an urban freshwater crisis is the crisis in Cape Town, South Africa that occurred in 2017-2018. This crisis became known as the "Day Zero" or the "Day Zero Crisis".

Time factor. Long-term crisis. A crisis whose progression through the system extends over a significant period. A long-term crisis in a city can occur due to various factors, such as political, economic, social, or ecological. An example of such a crisis is the crisis in Detroit, Michigan, USA.

The crisis of re-generation occurs when a city or district faces difficulties in attracting new residents and businesses, maintaining jobs and improving the lives of residents.

An example of such a crisis can be seen in the South Bronx area in New York, USA. In the 1970s and 1980s, the South Bronx faced various problems. Housing and infrastructure deterioration: many buildings were in disrepair, and the infrastructure required renewal; High levels of crime: the area was one of the most criminal in the USA, creating a negative image and deterring potential residents and investors; High unemployment: reductions in production and economic transformation led to job losses, affecting the economic well-being of the area.

A short-term crisis. A short-term crisis in a city can arise due to sudden events or emergencies that quickly threaten normal life and the functioning of the city. An example of such a recent crisis is the Morandi Bridge disaster in Genoa, Italy. In August 2018, the Morandi Bridge collapsed, causing a short-term crisis. The bridge was a vital transport artery and collapsing halted traffic, which hindered movement and further increased fear and anxiety among citizens. This example demonstrates how short-term crises can arise suddenly and require immediate action by authorities and emergency services to minimize damage and restore normal city life.

The character of the crisis development allows for forecasting the vector of its possible development and the consequences of its progress setting the relevance of the study. Crisis of birth; Crisis of avalanche growth; Turnaround crisis; Transformation crisis; Regression crisis; Rupture crisis; Merger crisis; Crisis of accumulating errors; Degradation crisis; Resource exhaustion crisis; Destruction crisis [19].

The birth crisis – the appearance of a new system. The establishment of world religions, revolutions, the appearance of global styles in architecture and art can all be considered as crises of birth, with processes in emerging systems possessing an extremely high potential leading to global changes.

An example of a "birth crisis" in urban architecture is the city of Astana, which was renamed to Nur-Sultan in 2019, the capital of Kazakhstan. This city started life as a new capital from scratch, and architects and urban planners began designing and constructing new buildings and infrastructure. The architectural style of Astana includes many modern and unique buildings, such as Bayterek, the Palace of Peace and Reconciliation, Astana Towers, and others. However, these architectural innovations have caused much controversy and debate among residents and architects. Some argue that the city's architectural style is too different from the historical architecture of other Kazakh cities.

An avalanche growth crisis is the occurrence of a chain reaction of system multiplication leading to widespread distribution of the system, in some cases more than the environment can sustain, and such an outburst can end tragically. The consequences of the planet's population growth and, correspondingly, the growth of urban populations over the last hundred years represent a clear example of this crisis.

A turnaround crisis. A turnaround crisis occurs when a system, although it does not change much or at all, begins to develop along a different trajectory. For social systems and individuals, this could be a process of change or disruption that alters goals, value systems, tools, etc.

An example of a "turnaround crisis" in urban development is the city of Barcelona, Spain, from the middle of the 20th century to the beginning of the 21st century. In the 1980s and 1990s, Barcelona faced a number of serious problems such as:

Infrastructure overage from the Olympic Games: after the 1992 Olympic Games in Barcelona, the city was left with an excess of infrastructure that needed readaptation and further use; Urban neglect: in some areas of the city, there were many illegal constructions and urban chaos;

Population dissatisfaction: the city's population was dissatisfied with the uncontrolled growth of tourism, the loss of traditional culture, and other socio-cultural aspects.

However, this crisis helped Barcelona overcome these problems and become one of the vibrant examples of sustainable and innovative urban development while preserving its unique cultural and architectural identity [20].

A regression crisis. A regression crisis occurs when a system that has been moving along a certain trajectory as if rolls back, losing what was "conquered". An interesting example of "regression" is the "Khrushchev Thaw". This period was characterized by the condemnation of Stalin's personality cult, the repressions of the 1930s, the liberalization of the regime, the release of political prisoners, the dissolution of the GULAG, the weakening of totalitarian power, the emergence of some freedom of speech, relative democratization of political and public life, openness to the Western world and more creative activity freedom [21].

A breakup crisis. A breakup crisis occurs when having reached a bifurcation point the system splits into two or more parts, each continuing their development along different trajectories. Moreover, such breaks in the system's development can occur repeatedly. An example is the division of the Roman Empire – an event that took place in 395 AD, after the death of the ancient Roman emperor Theodosius I, resulting in the division of the empire into Western and Eastern parts, each with its own emperor. Flavius Arcadius, Theodosius' elder son, became the governor of the Eastern Roman Empire, while his younger son Honorius became the governor of the West. The capital of the Eastern Empire became Constantinople, while the Western emperor resided initially in Mediolanum, later mostly in Ravenna, and only rarely in Rome.

Also, as an example of a "rupture crisis" could be Paris and the construction of high-rise skyscrapers in the La Défense district. In the second half of the 20th century, construction of skyscrapers began in La Défense, located in the west of Paris. These tall glass and metal structures contrasted with traditional Parisian architecture, causing debates and disagreements among Parisians and architects about preserving the historical appearance of the city and the influence of new skyscrapers on the city's aesthetics. Some believed that the skyscrapers could disrupt the harmony of Paris and detract from its cultural and historical values.

A breakup crisis in urban architecture can lead to a need for balance between modern development and the preservation of historical value. In the case of Paris, the discussion and development of strict architectural norms and rules for construction in the city's most meaningful districts were among the ways to address this breakup crisis.

A merging crisis. A merging crisis occurs when two independently evolving systems merge and continue to develop along a unified trajectory. The merging of nonlinear systems can often create over-summary effects that can be either beneficial or sometimes harmful to the system. An example is the merging of metropolises when two or more large cities combine, which can lead to coordination issues in urban planning, transportation infrastructure, and housing policy. The merging of New York and Brooklyn in 1898, for instance, led to difficulties in providing adequate infrastructure for the new metropolis. The merging of cities can also create problems with maintaining transportation infrastructure, as happened with the consolidation of Berlin in 2001. Issues with transportation, road traffic, and public transportation can create a crisis in ensuring the mobility of residents and so on.

These examples demonstrate that a merger crisis in urban architecture can be caused by various factors, and solving these problems requires a comprehensive approach to planning, management, and ensuring the sustainable development of cities.

An error accumulation crisis. An error accumulation crisis occurs when the harmful effects created by the system itself or acting upon it from outside accumulate to a level where attempts at self-regulation by the system and the number of errors come into resonance making it impossible for the system to adapt to the negative impacts being inflicted. An example is the Pruitt-Igoe residential district. The emigration from the area of the most financially capable population leads to a crisis of non-payment, which leads to the degradation of buildings and technological disasters, degradation leads to habitation of houses by a marginal population, and marginalization of the

population leads to an increasing crime rate. As the result, thirty-three 11-story residential buildings were demolished 20 years after their construction.

A degradation crisis. A degradation crisis is one in which the system partially collapses, simplifies, loses functions, efficiency, etc. An example is the city of Brasilia, designed by architects Lucio Costa and Oscar Niemeyer. The architects intended the city to become a model of social justice, which was not achieved. Instead, Brasilia became a "city of bureaucrats" and does not perform any significant economic functions, owing its prosperity exclusively to its capital status. This status leads to the fact that a huge number of internal migrants from other regions of the country arrive in Brasilia, who, unable to buy quality housing in the city itself, form a suburban belt around the capital with a very different quality of life and living conditions.

A resource exhaustion crisis. A resource exhaustion crisis occurs when resources needed for development are depleted or disappear altogether for various reasons. An example is the new Hebi. The economy of Hebi, a large city in Henan province, survives on coal mining. More than 20 years ago, the government decided to develop new minefields 40 kilometres from the historical part of the city – in the Qibin area. This is how appeared "New Hebi", a zone covering several hundred square kilometres, which has not been developed in 20 years.

Conclusions. The article examines the processes of architectural development as a system in the context of mutations under the influence of crises. It has become an axiom today that no crisis exists in isolation, and each of its manifestations, to some extent, affects many aspects of human life. Attempts to systematize existing representations of global crises are practically being made in all paradigms by thousands of scientists, and each tries to adapt the data they have to their own circle of knowledge and conceptions, based on personal competence.

As architects, we must primarily take a systematic approach to the study of this problem. Examining the city as a dynamic system that adapts and evolves under the influence of various factors is one of the key factors. Each mutation caused by a crisis can have a profound impact on the development of urban architecture. This system evolves and changes under the influence of various factors, including crises.

To successfully implement concepts for the transition of architecture to a new level of existence and development, one should have an understanding of the factors that will shape the vectors of future development of the city and architecture. It is important to note that crises can also stimulate innovative approaches and changes, contributing to the development of new solutions in the sustainable development of urban architecture, for example:

Crises can cause changes in societal needs. For instance, the COVID-19 pandemic forced many cities to adapt architectural solutions to ensure safety and social distancing. This may include the creation of open spaces for recreation, expansion of pedestrian zones, and improvement of public transportation systems.

Crises can promote innovation in architecture and construction. For example, energy crises can stimulate the development of more efficient and sustainable buildings that use renewable energy sources.

Crises such as floods, earthquakes, and hurricanes may require the creation of architectural solutions to protect cities and buildings. This may involve the construction of disaster-resilient buildings and infrastructure.

Crises can emphasize the importance of community participation in urban planning and architectural design processes. Citizens and local communities can play an active role in setting priorities and creating sustainable and functional cities.

References

- [1] O. Roy, "Subverting Colonial Portraiture: Utpal Dutt's Revisionary Dramatization of Political Violence, Anti-Imperialist Solidarity and Nationalist Resistance in The Great Rebellion", *Forum for World Literature Studies*, vol. 14(4), pp. 587-602, 2022.

- [2] S.C. Hertler, M. Penaherrera-Aguirre, H. Fernandes, A.J. Figueredo, "Arnold Joseph Toynbee: The Role of Life History in Civilization Cycling", *Life History Evolution*, pp. 129-141, 2018. doi:10.1007/978-3-319-90125-1_8.
- [3] V. Rao, A. Doin, R. Dzombak, D. Dogruer, A. Agogino, "Project-Based Learning in Disaster Response: Designing Solutions with Sociotechnical Complexity", *Proceedings of the Design Society*, vol. 2, p. 2373-2382, 2022. doi:10.1017/pds.2022.240.
- [4] C. Hadjimichali, *Crises Spaces. Structures, Struggles and Solidarity in Southern Europe*. Routledge, 2017.
- [5] S. Nazif, M.M. Khoie, S. Eslamian, "Urban Disaster Management and Resilience", *Springer International Publishing: Handbook of Disaster Risk Reduction for Resilience*, 2021. doi:10.1007/978-3-030-61278-8_7.
- [6] Y. Yamagata, H. Maruyama, *Urban Resilience: A Transformative Approach*. Elsevier Science, p. 319, 2016. doi:10.1007/978-3-319-39812-9.
- [7] M. Haraguchi, "How can a municipal government continue operations during megadisasters? An analysis of preparedness using complex adaptive systems", *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, vol. 29(5), pp. 779-792, 2020. doi:10.1108/DPM-04-2020-0114.
- [8] A. Garde, "New Urbanism: Past, Present, and Future", *Urban Planning*, vol. 5, pp. 453-653, 2020. doi:10.17645/up.v5i4.3478.
- [9] R. Cucca, C. Ranci, "Urban Policy in Times of Crisis: The Policy Capacity of European Cities and the Role of Multi-Level Governance", *Urban Affairs Review*, vol. 58(6), pp. 1493-1522, 2022. doi:10.1177/10780874211041710.
- [10] M. Laboy, D. Fannon, "Resilience Theory and Praxis: a Critical Framework for Architecture", *Enquiry The ARCC Journal for Architectural Research*, vol. 13, pp. 39-52, 2016. doi:10.17831/enq:arcc.v13i2.405.
- [11] I. Johnson, "Towards a Contemporary Understanding of The Limits to Growth", *Is the Planet Full?*, pp. 79-103, 2014. doi:10.1093/acprof:oso/9780199677771.003.0005.
- [12] H. Haken, *Synergetik*. Berlin: Springer, 1982.
- [13] J. Burry, M. Latifi, "Arcological City: Going Underground", *Architectural Design*, vol. 91(1), pp. 54-61, 2023. doi:10.1002/ad.2894.
- [14] N.U. Huda, I. Ahmed, M. Adnan, M. Ali, F. Naeem, "Experts and intelligent systems for smart homes' Transformation to Sustainable Smart Cities: A comprehensive review", *Expert Systems with Applications*, vol. 238, p. 238, 2023. doi:10.1016/j.eswa.2023.122380.
- [15] H. Bazazzadeh, B. Pourahmadi, P. Pilehchi, S.S. Safaei, U. Berardi, "Urban scale climate change adaptation through smart technologies", *Urban Climate Adaptation and Mitigation*, pp. 253-283, 2022. doi:10.1016/B978-0-323-85552-5.00011-7.
- [16] J. Tempelhoff, "The Anthropocene and historical consciousness", *Tydskrif vir Geesteswetenskappe*, vol. 61(2), pp. 429-451, 2021. doi:10.17159/2224-7912/2021/v61n2a3.
- [17] D. Hoyer, J.S. Bennett, J. Reddish, S. Holder, R. Howard, M. Benam, J. Levine, F. Ludlow, G. Feinman, P. Turchin, "Navigating polycrisis: Long-run socio-cultural factors shape response to changing climate", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 378(1889), pp. 1-10, 2023. doi:10.1098/rstb.2022.0402.
- [18] UN Environment. *Global Environment Outlook 3*. [Online]. Available: <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-3>. Accessed on: October 28, 2023.
- [19] B. Zlotin, A. Zusman, F. Hallfell, "TRIZ to invent your future utilizing directed evolution methodology", *Procedia Engineering*, vol. 9, pp. 126-134, 2011. doi:10.1016/j.proeng.2011.03.106.

- [20] S.P. Ramos, L. Mundet, "Tourism-phobia in Barcelona: dismantling discursive strategies and power games in the construction of a sustainable tourist city", *Journal of Tourism and Cultural Change*, vol. 19(1), pp. 113-131, 2021. doi:10.1080/14766825.2020.1752224.
- [21] A. Pismanik, "Lianozovo circle" and the Invention of New Regimes of Publicity in USSR in the 1950s and 1960s", *New Literary Observer*, vol. 173(1), pp. 140-151, 2011. doi:10.53953/08696365_2022_173_1_140.

РОЛЬ КРИЗ У ПРОЦЕСАХ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА РОЗВИТКУ МІСТА

¹Данилов С.М., доктор архітектури, доцент,
serhii.danylov@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7647-4665

¹Чечельницький С.Г., доктор архітектури, професор,
Serhii.Chechelnytskyi@kname.edu.ua, ORCID: 0009-0002-0247-9054

¹Ізбаш А.М., кандидат архітектури, доцент,
andrii.izbash@kname.edu.ua, ORCID:0000-0002-3265-2383

¹Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, 61002 Харків, Україна

Анотація. У статті представлено та розгорнуто висвітлюється систематизацію кризових подій, що виникають у процесі функціонування та розвитку міста інтерпретованого як складної системи, з великою кількістю різноманітних компонентів, що взаємодіють у динамічному ритмі. Місто розглянуто як об'єкт, що складається з безлічі систем і підсистем, життєві інтереси яких, з одного боку, розвивають, а з іншого – обмежують розвиток один одного. Змінюючись під тиском зовнішніх і внутрішніх чинників, ці елементи стикаються з обмеженнями, що накладаються суміжними системами. При цьому виникають суперечності життєвих інтересів підсистем міста. Якщо в результаті таких складних динамічних процесів не встановлюються нові межі компромісів, система міста переходить у стан кризи. При цьому самі суперечності є необхідними і неминучими умовами розвитку будь-якої системи, забезпечуючи її мутабельність при зміні зовнішніх умов існування. Фактично вони і є двигуном розвитку, змушуючи систему змінювати свої властивості. Без конфліктів і компромісів місто ризикує втратити здатність до адаптації, стаючи вразливим до зовнішніх впливів та внутрішніх збурень.

У дослідженні використовуються уявлення, взяті з теорії систем і синергетики, які дають можливість зробити глибші висновки про те, що місто як система демонструє класичний випадок втілення "Закону про єдність і боротьбу протилежностей", де відбувається постійне балансування між потребою максимально себе зберегти та вижити у мінливому світі. З іншого боку – прагненням до змін, що подекуди ведуть до кризи. Зазначені системні суперечності можуть бути усунені продуманим регулюванням, а можуть бути посилені через неправильно ухвалені рішення. Цей підхід відкриває нові горизонти для міського планування, де кожен крок повинен бути обміркованим і спрямованим на забезпечення сталого розвитку, зміцнення соціальної структури та підвищення якості життя городян. З такою перспективою керівництво міста може трансформувати потенційні кризи в можливість для розвитку та вдосконалення міського простору.

Ключові слова: архітектура, місто, криза, біфуркації, система.

Стаття надійшла до редакції 8.11.2023

TRENDS AND PROSPECTS OF MODERNISATION OF MULTI-STORY RESIDENTIAL BUILDINGS ON THE BASIS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

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

Abstract. According to the results of generalisation; quantitative, qualitative and comparative analysis of the reconstruction of residential buildings, trends and prospects for the reconstruction and modernisation of multi-story residential buildings are determined, considering the principles of sustainable development.

The problems, trends and prospects of the reconstruction of multi-story buildings were determined, which made it possible to find optimal ways of modernising residential buildings, considering controversial issues, opportunities and goals of sustainable development. The controversial issue is to find a balance between real opportunities, current and planned projects and ways of implementation, considering economic opportunities, legislation and controversial issues between Condominium and co-owners of multi-apartment buildings.

The problems are highlighted and ways to solve the improvement of projects for the modernisation of multi-story buildings are found. Possibilities and options for cost-effective modernisation of multi-story buildings are taken into account. The interests of all stakeholders were taken into account and ways to overcome misunderstandings were found.

When all issues are resolved, not only the interests of the project executor, the Condominium, co-owners of multi-apartment building, organisations and funds which financing the project, as well as the capabilities of the state and current legislative and regulatory acts regulating the financing and implementation of the project of modernisation of multi-story buildings are taken into account. Much attention is allocated to the goals of sustainable development of cities and communities. After all, when modernising multi-story buildings, it is necessary to focus not only on the needs of the present, but also to considering the needs of future generations and focus on effective, economically profitable prospects of the present and the distant future, taking into account the need for a healthy environment. Thanks to the amendments to the legislation, it became possible to improve the energy efficiency of buildings and reach a higher quality level in the modernisation of multi-story buildings.

Keywords: sustainable development, modernisation, reconstruction, multi-apartment buildings, multi-story buildings, residential construction, residential buildings.

Introduction. When examining the trends and prospects for the reconstruction of multi-story residential buildings based on the principles of sustainable development [1], it is essential to pay close attention not only to project implementation methods but also to opportunities, methods, and existing legislation [2, 3]. Consideration must be given to the goals of sustainable urban and community development, drawing from the outcome document of the United Nations General Assembly Summit [4]. It is crucial to recognise that existing financing programs do not always align with the needs, especially when it comes to comprehensive modernisation. Given that the burden of financing, in whole or in part, falls upon co-owners of multi-story buildings, represented by the Association of Co-Owners of Multi-Apartment Buildings (Condominium) as a non-profit organisation [5], the issue of disagreements among project participants arises. This problem also needs to be resolved, as the presence of such disagreements makes it impossible to implement programs and projects for the modernisation of multi-apartment residential buildings. When planning residential construction modernisation and searching for funding, many factors related to the process need to be taken into account: the project's relevance to the specific construction, the percentage and

proportionality of financing, the willingness of co-owners of multi-story buildings to participate in the project, and the state's ability to participate in the process. The lack of standardised projects, which do not cater to the individual needs of the building, is a significant problem. Sustainable development principles are often disregarded, as nearly all projects are oriented toward partial, rather than complete, modernisation, which also increases the project cost with the perspective of full modernisation. The need for co-financing by co-owners of multi-apartment buildings complicates the swift approval of work plans and sometimes renders project execution impossible.

When modernising a multi-story building, it is prudent to consider all factors and implement a reconstruction project, taking into account not only the comprehensive needs of today but also finding a balance between the current needs of humanity and the ability to meet the needs of future generations. Grounded in sustainable development principles, it is essential to focus on the need for a safe and healthy environment. Therefore, when planning project implementation, attention should be directed not only to economically advantageous materials and resources but also to ecological products and materials and systems that preserve the environment.

Analysis of Recent Research and Publications. The topic of modernising multi-story buildings and sustainable urban and community development has been under investigation for many years, both in a general sense and through specific case studies in various countries. V. Stankevičius together with other researchers, paid attention to the modernisation prospects of buildings in Lithuania and sheds light on the practical significance of modernising Soviet-era structures characterised by low insulation standards and requiring substantial energy consumption [6]. M. Piekarski with colleagues, in their article on the transformation of socialist realist housing architecture into a contemporary sustainable living environment, thoroughly examine the challenges of multi-apartment building construction from the 1950s and suggest potential directions for modernisation in alignment with contemporary housing requirements derived from the theory of sustainable development [7].

The results of research into the regeneration of social housing in old structures that no longer meet modern needs from social, political, economic, and sustainability perspectives are documented in a report on the regeneration of large micro-districts of social housing [8]. The European Union, emphasising that research into housing modernisation is not solely the domain of individual researchers but is also commissioned by governmental organisations, financed this work. The study delves into the issues of social housing in old structures in cities like Paris, Brussels and Milan. The research is particularly intriguing given that the old multi-story housing in Ukraine can also be categorised as social housing, as it is challenging to label it as adhering to social, political, economic, and sustainable development goals.

In the 2022 report of the United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), the issue of urban planning for sustainable and inclusive development is highlighted [9].

Numerous authors, particularly in the context of post-Soviet countries, have extensively examined modernisation of old buildings. R. Sendi and B. Kerbler study the residential complexes built after the Second World War in the countries of Eastern Europe and point out the need for the urgent implementation of an appropriate regeneration policy in order to create more attractive living conditions and prevent the potential degradation of neighbourhoods with such buildings [10]. The need to modernise the mass housing development of Soviet times is also noted by other researchers, who use the example of the city of Almaty (Kazakhstan) to demonstrate an approach to reconstruction [11]. Conditions and factors contributing to negative consequences of thermal modernisation in urban buildings are also. Specifically addressing the factors affecting the deterioration of the functioning of structures when partial modernisation is implemented [12].

The United Nations Development Programme guided by the principles of sustainable development and with the support of various funds and governmental institutions, is involved in projects aimed at the modernisation of multi-apartment residential buildings. An example of such a project can be found in the modernisation initiative in cities in Kazakhstan [13].

Ongoing research is essential, but over time, it may become less relevant due to the evolving nature of sustainable development goals, which tend to change along with shifting priorities and modernisation trends. The prospects for modernising multi-story buildings are also evolving with

the introduction of new inventions, materials, changes in legislation, and the availability of various programs and funds. Forums like the "Innovation and Modernisation of the Energy System in Central Asia," supported by global organisations, foster collaboration, innovation discussions, and lay the foundation for educating the next generation of energy experts while strengthening evidence-based policies [14]. This is vital because innovations in the energy system are a key component of modernising multi-story buildings and ensuring a safe and healthy environment.

Objective and Tasks. The objective of this study is to identify the optimal solution for the modernisation of multi-story residential buildings based on the principles of sustainable development. This includes taking into consideration the realities of existing and prospective projects, individual needs during the modernisation of residential structures, and aligning these with the financial, technical, legal, and regulatory aspects that are integral to the successful implementation of the project.

The set task was accomplished through the following steps:

Analysis of Modernisation Projects: Conducting an in-depth analysis of modernisation projects for multi-story buildings in Ukraine and other countries worldwide.

Analysis of Organisations and Funds: Investigating organisations and funds engaged in financing reconstruction projects.

Requirements and Stakeholder Analysis: Examining the requirements and parties involved in the modernisation process.

Legal Framework and Financing Options: Analysing and considering the legal framework and alternative financing options, which may include funding through Condominium or co-financing with property owners, while also addressing any contentious issues.

By undertaking these tasks, the study aimed to provide a comprehensive solution for the modernisation of multi-story residential buildings, adhering to sustainable development principles and addressing the multifaceted aspects of the modernisation process.

Materials and Research Methodology. Data for analysis were compiled through the search for existing projects related to the modernisation of multi-story residential buildings, both in progress and completed, within Ukraine and other countries. Furthermore, the study investigated the interest of co-owners of multi-apartment buildings and their potential participation in modernisation programs and projects. The results of this amalgamation yielded insights into the viability of organising and executing a reconstruction project under existing technical, financial, economic, and legislative conditions.

The research encompassed the following elements. **Legislative Foundation:** A thorough examination of the legislative framework, national building regulations, and the most recently adopted resolutions of the United Nations General Assembly, particularly those concerning the transformation of our world by 2030 for Sustainable Development, and reports on the regeneration of social housing micro-districts [2, 4, 8, 15]. The aforementioned documents, projects, and analytical instruments were scrutinised to address questions concerning the necessity of co-financing the modernisation by co-owners of multi-apartment buildings or Condominium, state involvement, and alignment with the objectives of sustainable urban and community development during project implementation.

The research methodology involved. **Objective Alignment Assessment:** Evaluating the congruence of predetermined objectives with real-world feasibility.

This approach aimed to provide a comprehensive understanding of research goals, financial considerations, legislative aspects, and their alignment with the principles of sustainable development within the context of modernising multi-story residential buildings.

Research Findings. The success of a multi-story residential building modernisation project is contingent on various stakeholders, making balanced management and equitable engagement a critical factor. The following key points emerged from the research:

1. **Balanced Project Management.** The management of the project must be executed in a balanced manner, with equal levels of responsibility and attention afforded to each stakeholder.

2. **Sequential Project Management Methods.** Project management methods should be

consistently applied to all activities throughout the entire project lifecycle.

3. **Harmonised Coordination.** All aspects of project management need to be coordinated and balanced to ensure the effectiveness of all project elements (components) during its development, planning, monitoring, and implementation stages.

4. **Collaborative Approach.** Project management should be collaborative, with the participation of all stakeholders in the identification, development, planning, implementation, and monitoring of the project. This approach ensures transparency and alignment, improves quality, strengthens human resources, and provides guarantees for project realisation at all levels.

5. **Ongoing Review and Reassessment.** The management processes of reviewing and reassessing are essential throughout the project's lifecycle to ensure that the development process, implementation plans, and expected outcomes remain relevant and significant for the present and the future. This practice enhances the accuracy of project design and planning for subsequent phases.

The project lifecycle for modernisation can be divided into three phases.

Pre-Investment Phase (Phase 1). This phase involves determining investment opportunities. During this phase, alternative options are analysed, and the preliminary project selection is made. This includes technical and economic justification, the decision to invest, and deriving conclusions from the project.

Investment Phase (Phase 2). In this phase, detailed project planning and contract negotiation take place. Organisational, financial, and legal foundations are established. Marketing activities are conducted, personnel are recruited and trained if necessary. The actual construction work is performed, and the project is handed over for operation.

Operational Phase (Phase 3). The operational phase is examined from both short-term and long-term perspectives. In the short term, possible issues related to each stage of work execution are studied. In the long term, the chosen strategy and the cumulative costs of project implementation are assessed. The results are evaluated in terms of benefits, including social, economic, financial, political, environmental, and other aspects.

Each stage involves specific actions, which are presented in Table 1.

Table 1 – Summary of Project Lifecycle Phases

Phase 1	Phase 2	Phase 3
Research: – Studying forecasts – Developing a program or searching for an existing one – Aligning the concept	Development of project cost estimates or approval of the developed program: – Project planning – Preparation of modernisation work – Contract negotiation – Preparatory work	Construction and installation work: – Modernisation work – Completion of the construction phase of the project – Handover of the facility – Contract closure – Analysis of results

The actions mentioned can be slightly altered depending on the organisational and financial components. However, considering that the Condominium, as the representative of the multi-apartment building co-owners, is the initiator, the client, or the party providing consent for the project and is a non-profit organisation under Ukrainian law [5], the financing of modernisation is carried out through the funds of financial institutions, non-profit organisations, funds, state funds, and so on. Of course, the work can be funded through loans or by the co-owners, who may participate in financing or co-financing with other organisations and funds. Given the above, there is a need to obtain the consent of all co-owners of the multi-apartment building for modernisation. As practice shows, if financing is covered by organisations, funds, the state, and other parties, obtaining consent is relatively easy. However, if the project requires co-financing by owners,

obtaining consent for the work becomes very difficult, as in many cases, the financial capabilities of co-owners may not cover their participation in the project. There are situations when even with full financing and the consent of the majority, some co-owners do not give consent or access to their premises if necessary, due to circumstances or their unwillingness. This is where the biggest challenge in project implementation arises. Today, typically, project financing for modernisation is done with the participation of non-profit organisations, funds, and their partners, so the process must adhere to transparency and compliance criteria. Since projects are usually financed by foreign organisations, compliance, as a measure of procedures, rules, and control measures, does not always align with the relevant requirements in accordance with current regulations and legislation, leading to questions about bringing all necessary processes into compliance.

The problem also arises from the readiness of the Condominium and co-owners to adhere to rules and procedures, as Condominium also bears significant responsibility for organising and overseeing the modernisation process in which co-owners must actively participate.

Insufficient organisation, justification, supervision, and coordination of financing are also problematic, which can lead to project underperformance or even its termination. This not only jeopardises the achievement of sustainable development goals but can also harm the building's operation and structure.

Statistics indicate cases where significant investments allocated to building reconstruction, instead of improving conditions and operational characteristics; significantly deteriorate the facility's function and structural integrity. These negative consequences usually result from organisational and construction mistakes and involve a complex and prolonged process that can worsen the environment, the condition of the structure, and the indoor microclimate. Work stoppage can lead to the deterioration of the building's walls. Natural and climatic factors can cause material decay, leading to the release of substances harmful to humans into the environment. As a result, funds are effectively allocated to worsen operational conditions rather than providing a positive effect.

The issue transcends from a purely construction problem to an administrative and civil issue. It pertains to the long-term negative impact on the environment, posing a threat to the health of residents of the reconstructed objects. This is why significant attention should be given to the development and oversight of organisational and technological measures. This underscores the crucial importance of adhering to one of the most essential functions, in addition to transparency and compliance, that non-profit organisations follow, such as monitoring, evaluation, accountability and learning (MEAL).

The issues of partial modernisation are addressed in an article discussing the negative consequences of reconstruction [12]. One drawback is the universality of projects, which usually cannot cater to the individual needs of each building. This problem was attempted to be resolved and implemented within the framework of the program "Model Projects: Comprehensive Energy-Efficient Modernisation of Multi-Apartment Buildings." This initiative, driven by the energy efficiency in Ukraine agency (dena) and its partners, including Kompetenzzentrum Großsiedlungen e.V., IWO e.V., and the Competence Centre for Large Housing Estates, was launched at the request of the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy of Germany. The project's goal is to develop effective and optimised solutions for comprehensive renovation, which is reflected in organisational, technical, and financial plans [16].

At the initiative of the President of Ukraine, a program for energy modernisation has been launched. As Prime Minister of Ukraine mentioned on the Government Portal [17], changes were made to several laws of Ukraine to facilitate the introduction of comprehensive thermal modernisation of buildings [2]. Additionally, the Government Portal reports the signing of a law to establish the State Decarbonisation and Energy Efficiency Transformation Fund, which will serve as a permanent and significant source of financing for numerous energy efficiency programs and projects in various sectors of the economy [18]. The President of Ukraine initiated a program aimed at protecting nature and the environment in Ukraine [19].

Such initiatives reflect the state's significant commitment to integrating European principles and sustainable development goals – addressing current societal needs with a view to future generations and environmental preservation. One of these approaches is the intention to modernise multi-apartment residential buildings without the financial participation of co-owners of these buildings, which streamlines the coordination of work between Condominiums and project participants.

Another drawback is the partial nature of modernisation in projects that exist, are ongoing, or are planned. Projects that are designed for partial modernisation with a view to full modernisation in the future tend to be more financially demanding and may not fully align with all sustainable development goals. Modernising a portion of a building to meet contemporary standards leaves the question of complete improvement, considering all needs, unresolved.

The higher cost of phased projects is related to the need to repeatedly search for or organise new programs and fund almost all phases of the project lifecycle each time (as shown in Table 1). Of course, the larger the project, the greater the financial burden. However, it is important to consider that the budget can be reduced through one-time actions for all work, making comprehensive modernisation more economically advantageous and aligned with sustainable development goals. It is also worth noting that phased implementation of full modernisation takes more time. Over time, circumstances change, leading to potential issues with previous agreements and plans, which can complicate the organisational aspects of the project and lead to cost escalation.

The repetitiveness of identical, repeatable tasks in the case of phased modernisation, in comparison to the quantity of work in a full modernisation, is illustrated in Figure 1.

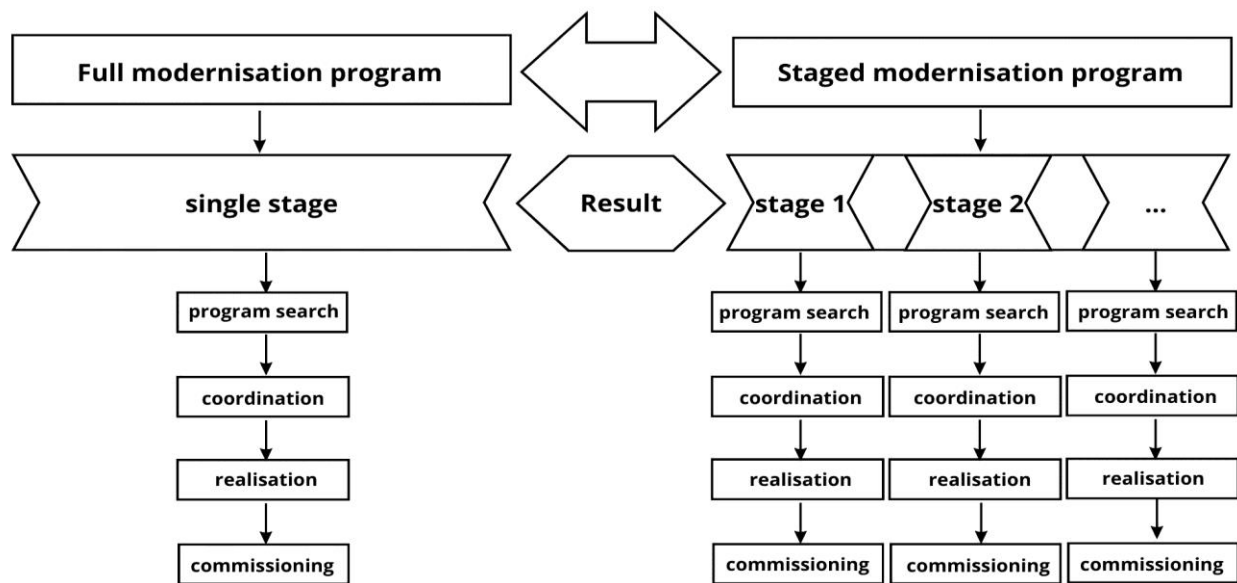


Fig. 1. Illustration of the modernisation program

It is worth mentioning that partial modernisation is generally less expensive than a complete one. However, when the ultimate goal is full modernisation, implementing the project incrementally will result in a higher overall project cost. Additionally, it may lead to additional engineering and architectural work due to the necessity of modifying previously completed stages.

Furthermore, it is important to consider that the modernisation program typically does not cover the entire cost of the work. Therefore, when proceeding incrementally with the perspective of full modernisation, the Condominium will face the challenge of securing funding and obtaining approval from co-owners at each stage of the project. For example, you can look at the "Energy House" program, which offers several program packages covering up to 70% of the total project cost, depending on the package of measures (scope of work) [20]. According to program information, participating in the full package of services will result in significantly greater energy savings than participating in a package with a partial scope of modernisation. Considering the

process of obtaining co-owners' approval and co-financing, gaining consent multiple times will be more challenging than settling the process once.

In planning, it is essential to pay attention to the calculation of project effectiveness, which involves surpassing the value of the outcome relative to the costs. In the case of residential building modernisation, efficiency should be understood as the achievement of all project objectives.

Conclusions. One of the goals of sustainable development is to overcome poverty. Achieving this goal allows us to consider the implementation of projects for full building modernisation, considering other sustainable development objectives. These projects can be funded by co-owners of multi-story buildings with the support of the state. These projects should be oriented towards the individual problems of each building or group of buildings, thus promoting greater consent from co-owners when the desire for more comfortable living conditions takes precedence over funding issues. Currently, the primary reason for co-owners' disagreement regarding modernisation is their financial inability to co-finance the project if it cannot be fully covered by existing programs. Partial modernisation programs align with sustainable development principles only partially as they do not cover all the needs and are only partly focused on the requirements for a safe and healthy environment, especially regarding future generations.

The involvement of the state can reduce the costly part of the project. It allows for comprehensive modernisation with the development of individual solutions for similar buildings with identical technical and engineering requirements. As a result, the cost of modernising one building will decrease, eliminating the need for additional financial expenditure on a new project for similar constructions when searching for new funding programs.

A comprehensive approach to modernising residential buildings, considering all necessary reconstruction work and project development for groups of buildings with identical architectural, engineering, and technical needs, will not only reduce the financial burden but will also enable the achievement of the goals of sustainable urban and community development. It will make the process more straightforward and efficient at all stages of the project's life cycle, through coordination and the identification and resolution of issues with the initial pilot building groups.

The modernisation of multi-story residential buildings in the context of sustainable development is achievable through a comprehensive approach aimed at achieving all the objectives related to city and community goals, including responsible resource consumption and production, industrial development, innovation, infrastructure, poverty alleviation, strong health and well-being, clean and accessible energy, economic growth, and decent work. Only a comprehensive approach to all these processes can ensure the successful implementation of projects and their efficient long-term operation.

Sustainable development as a whole, with goals outlined for the year 2030 and, in particular, sustainable urban and community development and effective governance, holds paramount importance in ensuring the quality of life for people [4].

Enhanced and well planned financial and project participation by local and state authorities, along with the improvement of citizens' economic standards, will provide the foundation for the prospect of complete modernisation of multi-story housing complexes.

References

- [1] Organizaciya ob'ednanih nacij. Ukraïna. [Online]. Available: <https://ukraine.un.org/uk/sdgs>. Accessed on: September 28, 2023.
- [2] Pro vnesennia zmin do deyakyh zakoniv Ukrainy schodo stvorennia umov dlia zaprovadzhennia kompleksnoi modernizacii budivel. Zakon Ukrainy № 2392-IX 09.07.2022. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2392-20#Text>. Accessed on: September 28, 2023.
- [3] Portal iedynoi derzhavnoi elektronnoi systemy u sferi budivnyctva. [Online]. Available: https://e-construction.gov.ua/laws/doc_type=2. Accessed on: September 28, 2023.

- [4] United Nations Population Fund. [Online]. Available: https://www.unfpa.org/sites/default/files/resource-pdf/Resolution_A_RES_70_1_EN.pdf. Accessed on: September 28, 2023.
- [5] Pro obiednannia spivvlasnykiv bagatokvartyrnogo budynku. Zakon Ukrainy № 2866-III 29.11.2001. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2866-14#Text>. Accessed on: September 28, 2023.
- [6] V. Stankevičius, J. Karbauskaitė, A. Burlingis, J. Šadauskienė, R. Morkvėnas, "Expanding the possibilities of building modernization: case study of Lithuania", *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 20, no. 6, pp. 819-828, 2014. doi.org/10.3846/13923730.2014.929599.
- [7] M. Piekarski, Ł. Bajda, E. Gotkowska, "Transformation of Socialist Realistic Residential Architecture into a Contemporary Sustainable Housing Habitat—General Approach and the Case Study", *Sustainability*, vol. 13, no. 23:13486, 2021. doi.org/10.3390/su132313486.
- [8] N. Aernouts, E. Marranghi, M. Ryckewaert, (Eds.), *The Regeneration of Large-Scale Social Housing Estates. Spatial, Territorial, Institutional and Planning Dimensions*. Sohlab: Brussels, Belgium, 2020.
- [9] UN-Habitat. [Online]. Available: https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/07/chapter_6_wcr_2022.pdf. Accessed on: September 29, 2023.
- [10] R. Sendi, B. Kerbler, "The Evolution of Multifamily Housing: Post-Second World War Large Housing Estates versus Post-Socialist Multifamily Housing Types in Slovenia", *Sustainability*, vol. 13, no. 18:10363, 2021. doi.org/10.3390/su131810363.
- [11] K. Murzabayeva, E. Lapshina, A. Tuyakayeva, "Modernization of the Living Environment Space Using the Example of an Urban Array of Residential Buildings from the Soviet Period in Almaty", *Buildings*, vol. 12, no. 17:1042, 2022. doi.org/10.3390/buildings12071042.
- [12] V.M. Sokolenko, O.I. Golodnov, K.V. Sokolenko, M.V. Filat'iev, "Umovi ta faktori negativnih naslidkiv rekonstrukcii - teplovoi modernizacii mis'kih budivel'", *Galuzeve mashinobuduvannya, budivnictvo*, vol. 1, no. 56, pp. 87-99, 2020. doi.org/10.26906/znp.2020.54.2278.
- [13] UNDP. Kazakhstan. [Online]. Available: <https://www.undp.org/kazakhstan/press-releases/effective-financing-model-modernization-multi-apartment-residential-buildings-was-implemented-capital>. Accessed on: September 29, 2023.
- [14] UNDP. Global. [Online]. Available: <https://www.undp.org/energy/events/almaty-energy-forum-innovating-and-modernizing-energy-systems-central-asia>. Accessed on: September 29, 2023.
- [15] Ministerstvo vidnovlennia. [Online]. Available: <https://mtu.gov.ua/content/chinni-budivelni-normi.html>. Accessed on: September 29, 2023.
- [16] Nimec'ko-Ukrains'ki energoefektyvni budynky. [Online]. Available: <http://sampleprojects.org>. Accessed on: September 29, 2023.
- [17] Uryadovij portal. [Online]. Available: <https://www.kmu.gov.ua/en/news/denys-shmyhal-during-inspection-boiler-facility-ternopil-region-set-energy-efficient-measures-will-help-reduce-sums-utility-bills>. Accessed on: September 29, 2023.
- [18] Uryadovij portal. [Online]. Available: <https://www.kmu.gov.ua/en/news/prezydent-pidpysav-zakon-shchodo-stvorennia-derzhavnoho-fondu-dekarbonizatsii-ta-enerhoefektyvnoi-transformatsii>. Accessed on: September 29, 2023.
- [19] Oficijne internet-predstavnictvo Prezidenta Ukraini. [Online]. Available: <https://www.president.gov.ua/en/news/glava-derzhavi-dav-start-proektu-zelena-krayina-spryamovanom-68865>. Accessed on: September 29, 2023.
- [20] Energodim. [Online]. Available: <https://energodim.org>. Accessed on: September 29, 2023.

**ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ МОДЕРНІЗАЦІЇ БАГАТОПОВЕРХОВИХ
ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ НА ЗАСАДАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ**

Деркач С.І., аспірант,

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

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

Анотація. За результатами узагальнення; кількісного, якісного і порівняльного аналізу реконструкції житлової забудови визначено тенденції та перспективи реконструкції і модернізації багатоповерхових житлових будинків з урахуванням засад сталого розвитку.

Визначено проблематику, тенденції та перспективи реконструкції багатоповерхових будинків, що дало змогу знайти оптимальні шляхи модернізації житлової забудови з урахуванням спірних питань, можливостей та цілей сталого розвитку. Спірним питанням є знайти баланс між реальними можливостями, діючими і запланованими проектами та шляхами реалізації, враховуючи економічні можливості, законодавство та спірні питання між Об'єднаннями та співвласниками багатоповерхових будинків.

Висвітлено проблеми та знайдено шляхи вирішення вдосконалення проєктів з модернізації багатоповерхових будинків. Враховано можливості і варіанти для економічно вигідної модернізації багатоповерхових будинків. Враховано інтереси всіх зацікавлених сторін та знайдено шляхи подолання непорозумінь.

При вирішенні всіх питань враховано не лише інтереси виконавця проєкту, Об'єднання співвласників багатоповерхових будинків (ОСББ), співвласників багатоповерхового будинку, організацій і фондів, що фінансують проєкт, а також можливості держави та чинні законодавчі і нормативні акти, що регулюють фінансування та реалізацію проєкту модернізації багатоповерхових будинків. Велика увага приділена цілям сталого розвитку міст і громад. Адже при модернізації багатоповерхових будинків необхідно орієнтуватися не лише на потреби сьогодення, а й враховувати потреби майбутніх поколінь і орієнтуватися на ефективні, економічно вигідні перспективи сьогодення та далекого майбутнього, з урахуванням потреби у здоровому довкіллі. Завдяки внесенню змін до законодавства з'явилась можливість вдосконалити енергоефективність будинків та вийти на більш якісний рівень в модернізації багатоповерхової забудови.

Ключові слова: сталий розвиток, модернізація, реконструкція, багатоквартирні будинки, багатоповерхові будинки, житлова забудова, житлові будинки.

Стаття надійшла до редакції 17.10.2023

TYOLOGY AND INFLUENCE OF CRISIS PERIODS ON THE DEVELOPMENT OF RESIDENTIAL BUILDINGS IN MODERN CITIES

Morozova T.T., post-graduate student,
tanyamorozova0210@gmail.com , ORCID: 0009-0002-5269-8749
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture
4 Didrihson str., Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. The impact of crisis periods on the development of modern cities and residential development is an extremely important aspect of urban infrastructure analysis and planning. Different types of crises, including natural crises, economic crises, social conflicts, pandemics, military conflicts and others, can have different consequences for cities and residential development. In the context of crisis periods, cities need to be prepared for the challenges that may arise. This means developing effective action plans that include adapting to new conditions, restoring the housing stock, ensuring housing affordability and protecting residents from various threats. It is also important to remember that crises can test the resilience of cities and housing infrastructure, but they can also create opportunities for improvement and innovation. Bringing authorities, communities and developers together to work and develop together can help create more resilient and viable housing estates that meet the demands of the new realities.

The purpose of this paper is to study the typology of crisis periods for modern cities, to identify different types of crises, their characteristics and impact on the development of residential development. The study was conducted using graph analytical and mathematical methods. The research requires the use of methods of both general scientific nature (systematic analysis and synthesis) and those borrowed from other fields of knowledge (philosophy, economics, sociology, psychology), which is explained by the phenomenological nature of the research object itself.

In general, given the different types of crisis periods, it is important to develop comprehensive strategies to ensure the sustainability and safety of housing in modern cities. Responding to and recovering from crises determines how successful the development of cities and housing infrastructure will be in the future.

Keywords: crisis periods, urban development, residential development, impact of crisis periods on urban development, development of residential development in crisis periods.

Introduction. The impact of the crisis periods on the development of residential buildings in modern cities is the topic that reflects the multi-aspect interaction between social, economic, technological, and cultural factors in the structure formation of the urban environment. The history of urban development shows that the crises, regardless of their nature, have always been accompanied by the impact on urban development and residential development. From the collapse of economic systems to the global conflicts, from the natural disasters to the epidemics, these crises lead to the changes in the residents' lifestyle, new requirements for existing and new development to help them adapt to new realities.

This article examines the typology of the crisis periods for urban settlements, their impact and consequences on housing infrastructure and urban structure to better understand the contribution that crises make to the formation of the modern city.

Analysis of recent research and publications. The scientific work [1] uses the basic methodology of Kulp and Strauss (2017) to assess the vulnerability of affordable housing (and general housing for comparison), who defined the expected annual vulnerability – the amount of a certain variable (e.g., dwelling stock) that is expected to be affected by at least one coastal flood risk event during a current year. The vulnerability of individual buildings and housing units within them is assessed by calculating their expected annual exposure and a new metric is introduced – the expected

annual number of flood risk events – the expected total number of flood risk events that each building/unit may have. During the crisis, the community members need a clear understanding of what is happening and that an effective response to the crisis will not be delayed. People want to know how the crisis will affect them and how to get help. In addition, the public safety agencies, emergency services and volunteers need to be informed quickly. Crisis communication is the link between the local authorities and the community – the community members, civic activists and other groups – before, during, and after the crisis. The need for crisis communications also lies in the fact that they can not only lighten or eliminate the crisis consequences but can sometimes build a more positive reputation for an organization than it had before the crisis [2].

Problem definition. The study of the typology of crisis periods for modern cities, the definition of different types of crises, their characteristics and impact on the development of residential development. The vision of the characteristics of crisis periods will help cities to develop more effective strategies for managing, adapting and responding to the challenges they may face in future.

Aims and goals. To study the typology of crisis periods for modern cities, to identify different types of crises, their characteristics and impact on the development of residential development.

Materials and research methodology. The materials for this study are the typology of residential development in modern cities. In particular, the typology of crisis periods for urban settlements, their impact and consequences for the housing infrastructure and the structure of the cities were considered in order to better understand the crises contribution to the formation of the modern city. The combination of the results research of the available material base and the theoretical foundations of residential development typology in modern cities became the main methodological basis of this research paper.

The main part. In today’s world, the cities face a variety of challenges and crises that can dramatically affect their development and functioning [3]. Providing the constant changes in the geopolitics, society, technology and environment, the cities are becoming real centers of adaptation and innovation [4]. In such circumstances, it is important to develop the comprehensive strategies and action plans to solve various types of crisis situations. Crisis periods for modern cities can be different according to their nature and consequences. These crises pose the challenges to safety, economic sustainability, public health, housing infrastructure, and many other aspects of urban life [5]. In this context, the classification system can be useful for understanding and analyzing crisis situations. Depending on the cause, the crisis periods for the cities are divided into the following main groups (Fig. 1).

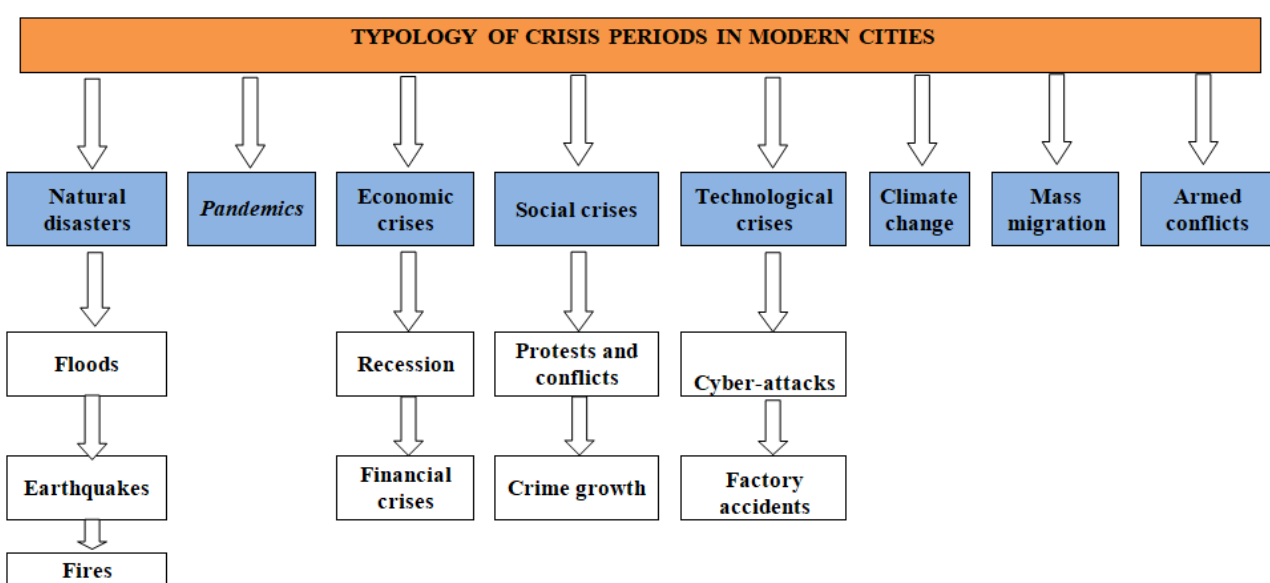


Fig. 1. Typology of the crisis periods in modern cities depending on the causes of the crisis

Natural disasters.

Floods – the high-water levels can lead to urban flooding and damage of the infrastructure and residential buildings. The most common consequence of floods is the water flooding of the residential areas [1]. This can lead to the destruction of the buildings, damage of the property, and life danger. The low-rise residential buildings are particularly affected by the floods (Fig. 2).

The studies show that it is the so-called affordable and social low-rise housing that is most often affected, as its residents are the most vulnerable group of the community.



Fig. 2. USA, Los Angeles, New Orleans. Residential development and flooding (Hurricane Katrina), 2005

The floods can also result in the mixing of wastewater with the water bodies, which can lead to the pollution of water sources and endanger human life or health.

In future, when developing a strategy for the development of residential areas, it is possible to provide the list of the recommendations and additional requirements for the residential premises [6]. Such as a higher ground floor level, additional drainage systems and other measures to prevent the future flooding of the residential premises.

Earthquakes – the seismic activity can lead to the destruction of the residential buildings, infrastructure, and casualties among the city residents. Depending on the development density and terrain, the earthquake consequences may vary in the scale and number of resources required for the recovery.

It should also be noted that in the seismic areas, the requirements and building codes for the design of residential and public buildings are more stringent (especially in terms of the structural diagram of the buildings). However, there are large-scale earthquake damage almost every year (Fig. 3).

Fires – the forest fires or urban fires can create emergencies (Fig. 4) and lead to the destruction of residential buildings, including the residential blocks and infrastructure. This can require large resources to rebuild housing and infrastructure. Such crises create an immediate danger for the lives and safety of the residents. The residential development should take into account safety standards, such as availability of layouts to facilitate quick exits and equipping dwellings with fire safety systems.



Fig. 3. Turkey, Gaziantep city. Effects of the earthquake and destruction in the residential blocks, 2023



Fig. 4. USA, California, Santa Rosa. Effects of the wildfire and affected low-rise residential buildings, 2017

Pandemics. The global diseases – the pandemics, such as COVID-19, can lead to a large spread of disease and require the control and treatment measures. In the short term, such large-scale crises have a significant impact on the urban development. For example, the COVID-19 pandemic has had a significant impact on the residential development in modern cities, causing a number of changes and trends.

First of all, it is a change in housing demand. Many people have switched to remote work, which has led to a greater demand for comfortable, spacious housing in the complexes with the additional infrastructure for the residents of this building. It has led to the increasing of housing demand outside the city, in a less polluted environment. Secondly, it is the increasing of hygiene requirements, namely for the ventilation and air purification systems.

The design and construction of the residential buildings has been adapted to meet these new requirements. When examining the individual residential units (apartments), the new remote working lifestyle during the pandemic requires more functional spaces and area separation for relaxing/entertainment, eating, working and sleeping (Fig. 5, 6). The COVID-19 pandemic has also influenced the development of public areas in residential complexes, including the space increase for outdoor terraces, barbecues and sports areas [7].

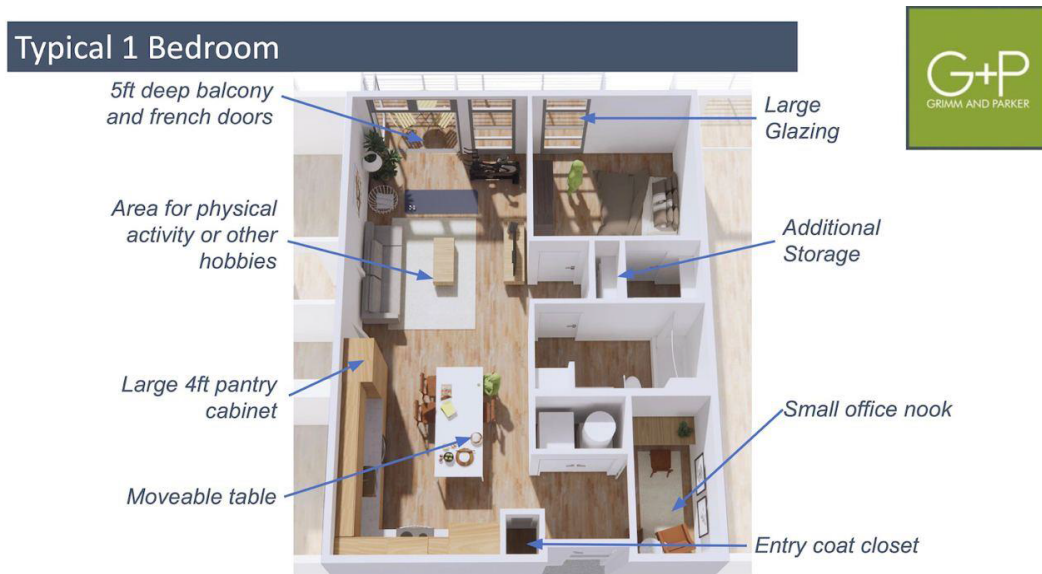


Fig. 5. Typical layout of a 1-room apartment – plan by Grimm+Parker, 2021

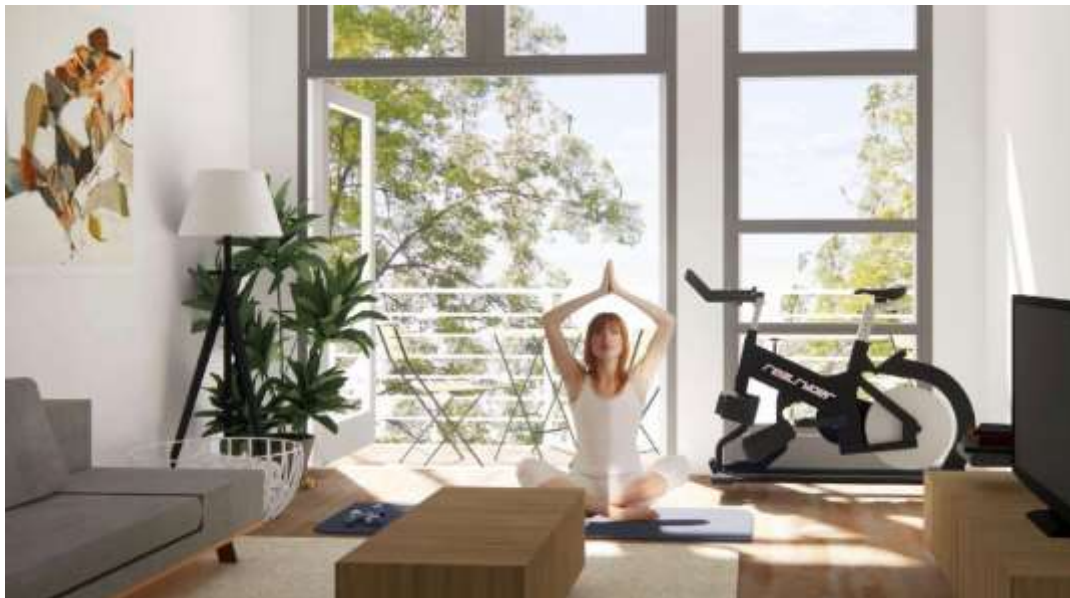


Fig. 6. Typical layout of a 1-room apartment – visualization by Grimm+Parker, 2021

Another aspect is the impact on property values. In some cases, the pandemic has had a short-term impact on housing prices. The large cities became less attractive for some time period due to the risks associated with the pandemic, while smaller towns and districts gained popularity. In some cases, the pandemic has led to rethinking of urban densities, including more space for green areas and open spaces.

The COVID-19 pandemic has significantly changed the approaches to housing development in the cities, prompting greater consideration of comfort, safety and hygiene in the residential complexes [8].

Economic crises.

Recession – the economic contraction may lead to mass unemployment and income loss in the city, which will have a direct impact on the housing development and the lifestyle of the residents. The recession can worsen the living conditions of many residents, in particular, lead to the increasing of housing problems and decreasing of the life quality.

Financial crises have a significant impact on the development of the housing sector [9]. The following key trends can be during such crises:

- decreasing of housing demand;
- the delays in the construction of the residential complexes;
- decreasing of housing prices (lower demand may lead to lower housing prices, which may affect the price and quality of the construction in the real estate market);
- the complications in loan issues;
- the development and promotion of alternative forms of housing (during the financial crises, more people may prefer alternative forms of housing, such as renting or sharing);
- the variation in the geography of housing development (new financial realities change the priorities of the investment and development in different areas);
- the social issues (such as the increasing number of people without a fixed place of the residence and the growing need for social housing in the short term).

Social crises.

Protests and conflicts – the social conflicts due to the political differences, social inequality, and racism create the tension and an unsafe environment in the city. The most popular locations for the protests are usually the central locations or important infrastructure facilities, rather than residential areas. However, it is systematic and long-term conflicts (such as social inequality or racism) that lead to the most negative consequences. Such crises endanger human life or health and create unmanageable social processes.

The impact on the housing development of social inequality, which often leads to the separation of the residential areas from the affordable and more expensive housing, should be examined separately. This "separation" contributes to the development of social conflict and worsens the quality of the urban living environment [10].

Social conflicts can lead to the revision and rethinking of city development plans and housing projects. The changes of the city development plan, and the planning of new residential areas may be the response to residents' demands and complaints.

Crime growth – the growth of crime and violence can lead to the crisis situation for public safety and urban development.

One of the consequences is housing demand decreasing in this crime-ridden neighborhood and, consequently, decreasing of property prices. On the other hand, the residents face increased security costs, including the installation of the security systems and the hiring of the security firms. This increases the cost of housing and maintenance.

However, Urban science offers simple tools to make the cities safer and more transparent for the residents [11]. For example, the good street lighting and the presence of people in the street are much more effective tool than installing the fences or watching cameras.

Technological crises.

Cyber-attacks – the attacks on the information systems can lead to the privacy violation and the security of the citizens. Such crises are becoming more frequent and primarily affect the security of the residential environment. Cyber-attacks can be directed both at a single apartment (residential unit) or an entire residential complex.

Many modern residential premises are equipped with "smart" devices that are connected to the Internet. Cyberattacks can affect such systems, including the control of lighting, temperature and other aspects of home comfort. On the other hand, the most common target of cyberattacks is the personal data of the residents, which poses a threat of privacy and personal security.

Factory accidents – the accidents at the industrial enterprises can lead to the emissions release and threaten the public health of joint residential areas. Typically, the state building codes and standards restrict the construction of the industrial facilities near the residential areas. However, a short-term consequence of an accident at the industrial enterprise may be the evacuation of the population until the accident is fully remediated and a safe living environment is restored.

Climate change. Extreme weather conditions. Climate change leads to the extreme weather conditions, such as heavy showers, hurricanes, tornadoes and droughts. It damages camp accommodation facilities and leads to loss of property and even threats to the livelihoods of city residents.

Speaking long-term, the climate change requires the cities to develop more sustainably, save resources, and use the recycled and more environmentally friendly materials. The conscious environmental approach requires the changes of housing design (such as additional opportunities for waste sorting, the battery charging for electric vehicles, the use of alternative energy sources, etc).

Mass migration. Refugees and forced migrants: The growth of refugees and forced migrants puts the pressure on the housing market, social services and infrastructure.

With a growing number of the residents, the cities have to adapt the infrastructure and public services to new needs [12]. This includes the development of transport, education, healthcare and other branches. Such needs are usually difficult to meet quickly. The temporary housing for migrants is not often comfortable and safe. Therefore, in the short term, mass migration is a great stress for the city, its residents and the refugees themselves.

However, in the long run, the arrival of migrants usually leads to increasing of housing demand in the city. This creates new opportunities for the housing developers and influences the property prices. Migrants can have a positive impact on the urban development, but their acceptance and integration require the consideration to various aspects of the housing sector, from housing affordability to socio-cultural issues and infrastructure development.

Armed conflicts. Military operations and occupation of urban areas. Armed conflicts have a serious and nonreciprocal effect on housing and housing infrastructure (Fig. 7). Military operations lead to the destruction and damage of the residential buildings, as well as to the safety threats of the residents, including physical danger and injury. During the armed conflicts, the residents need to look for the strong rooms and bomb shelters.

The war forces the residents to evacuate and look for the strong rooms in other places or even in other countries. This leads to massive migration and creates urgent housing problems for the refugees. In the long term, the forced migration to other territories is critical to the future development of the city after the conflict ends.

The infrastructure that serves residential areas, such as water, electricity and transport systems, is damaged and destroyed during the conflict [13-15]. This leads to a temporary loss of access to the communication lines, services and comfortable living standard.

Military conflicts also lead to decreasing of the property values in the territories where they are. It can affect homeownership and mortgages, as well as delays and reconstruction of new housing developments.

War has long-lasting social and psychological consequences on the residents, including post-traumatic stress and other health problems.



Fig. 7. Ukraine, Donetsk region, Avdiivka. Consequences of shelling of residential areas during the russian invasion, 2023

Conclusions and directions for further research. The impact of the crisis periods on the development of modern cities and residential development is an extremely important aspect of the urban infrastructure analysis and planning. The different types of crises, including natural crises, economic crises, social conflicts, pandemics, military conflicts, and others, can have different consequences for the cities and residential development.

In the context of the crisis periods, the cities should be prepared for the challenges that may arise. This means the development of the effective action plans that include adapting to new conditions, the restoration of housing facilities, providing housing affordability and treat protection.

It is also important to take in account that the crises can test the stability of the cities and housing infrastructure, but they can also create the opportunities for the improvement and innovation. The interaction between the local authorities, communities and developers to work and develop together can create more stable housing developments that meet the demands of the new realities.

In general, given the different types of the crisis periods, it is important to develop the comprehensive strategies to provide the sustainability and safety of housing in modern cities. Responding to and recovering from the crises determine how successful the development of the cities and housing infrastructure will be in the future.

References

- [1] Maya K Buchanan et al, "Sea level rise and coastal flooding threaten affordable housing", *2020 Environ*, 15, 124020, 2020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb266>.
- [2] D. Konyk, *Dovira hromady: kryzovi komunikatsii orhaniv mistsevoho samovriaduvannia: prakt. posibnuk*, 2020.
- [3] P.V. Kukhta, "Kryzy, yikh prychny ta naslidky", *Efektivna ekonomika*, no. 10, 2012. [Online]. Available: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1439>.
- [4] Kryza v budivelni sferi. [Online]. Available: https://www.ilo.org/global/publications/world-of-work-magazine/articles/WCMS_115510/lang--es/index.htm.
- [5] A.V. Honcharuk, "Vplyv kryzovykh yavlyshch na rozvytok budivelnoi haluzi Ukrainy", *Ekonomika i suspilstvo*, vyp. 15, pp. 108-114, 2018. <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewById/766694>.
- [6] Yu. I. Haiko ta in., *Problemy ta perspektyvy rozvytku zhytlovoi zabudovy v umovakh kompleksnoi rekonstruktsii mista* : monohrafiia; za zah. red. Yu. I. Haika. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 2019.
- [7] S.I. Konyk, "Ushchilnennia zabudovy terytorii istorychno sformovanykh mist (na prykladi Lvova)", dis. ... d-ra filosofii: 191 – Arkhitektura ta mistobuduvannia, Natsionalnyi universytet «Lvivska politekhnika. Lviv, 2021.
- [8] M.O. Kyzym, N.V. Bielikova, O.M. Levanda ta M.S. Doronina, "Vplyv pandemii COVID-19 na rehionalni rynky pratsi Ukrainy", *Problemy ekonomiky*, no. 1(51), pp. 59-69, 2022. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2022-1-59-69>.
- [9] Z. Rudenko, "Finansova kryza v Ukraini 2014-2015 rokiv: prychny ta instrumenty rehuliuвання", *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, vyp. 25.7, pp. 216-221, 2015.
- [10] L.T. Shevchuk, *Prostorovyi rozvytok rehionu: sotsialno-ekonomichni mozhyvosti, ryzyky i perspektyvy*: monohrafiia. NAN Ukrainy. Instytut rehionalnykh doslidzhen. Lviv, 2011.
- [11] K. Mezentsseva, *Urbanistychna Ukraina: v epitsentri prostorovykh zmin* : monohrafiia. Kyiv, 2017.
- [12] L.H. Komakha, *Hlobalizatsiini vyklyky: uriaduvannia maibutnoho*: monohrafiia. Kyiv: KNU im. T.H. Shevchenko, 2022.
- [13] M.O. Kyzym, I.B. Semyhulina ta I.V. Yaroshenko, "Chynnyky prostorovoho rozvytku terytorialnykh hromad u systemi derzhavnoho upravlinnia terytoriiamy", *Problemy ekonomiky*, no. 2(52), pp. 83-92, 2022. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2022-2-83-92>.

- [14] Zur'ain Zamri et al, "Mapping of Affordable Housing Sustainability Level from Environmental Geospatial Aspect in Gombak, Selangor", *2020 Environ*, 540, 012047, 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/540/1/012047>.
- [15] Nurul Aini Ismail et al, "Review of Spatial Model to Assess Suitability of Affordable Housing Based on Demand Criteria", *2020 Environ*, 540, 012077, 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/540/1/012077>.

ТИПОЛОГІЯ ТА ВПЛИВ КРИЗОВИХ ПЕРІОДІВ ЧАСУ НА РОЗВИТОК ЖИТЛОВОЇ ЗАБУДОВИ У СУЧАСНИХ МІСТАХ

Морозова Т.Т., аспірантка,
tanyamorozova0210@gmail.com, ORCID: 0009-0002-5269-8749
Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. Вплив кризових періодів на розвиток сучасних міст та житлову забудову є надзвичайно важливим аспектом аналізу та планування міської інфраструктури. Різні типи криз, включаючи природні кризи, економічні кризи, соціальні конфлікти, пандемії, військові конфлікти та інші, можуть мати різні наслідки для міст і житлової забудови. У контексті кризових періодів міста повинні бути готовими до викликів, які можуть виникнути. Це означає розробку ефективних планів дій, які включають адаптацію до нових умов, відновлення житлового фонду, забезпечення доступності житла та захист мешканців від різних загроз. Важливо також пам'ятати, що кризи можуть перевіряти стійкість міст та житлової інфраструктури на міцність, але вони також можуть створювати можливості для вдосконалення та інновацій. Об'єднання зусиль влади, громад та забудовників для спільної роботи та розвитку може допомогти створити більш стійкі та життєздатні житлові комплекси, які відповідають вимогам нових реалій.

Метою даної роботи є дослідження типології кризових періодів для сучасних міст, визначення різних видів криз, їх характерні особливості та вплив на розвиток житлової забудови. Дослідження проведено з використанням графоаналітичних та математичних методів. Для дослідження необхідне застосування методів як загальнонаукового характеру (системний аналіз і синтез), так і запозичених з інших галузей знань (філософії, економіки, соціології, психології) що пояснюється феноменологічною природою самого об'єкта дослідження.

В цілому, враховуючи різні види кризових періодів, важливо розробляти комплексні стратегії для забезпечення сталості та безпеки житла в сучасних містах. Реагування на кризові ситуації та відновлення після них визначає, наскільки успішним буде розвиток міст та житлової інфраструктури в майбутньому.

Ключові слова: кризові періоди часу, міський розвиток, житлова забудова, вплив кризових періодів часу на міський розвиток, розвиток житлової забудови в кризові періоди.

Стаття надійшла до редакції 1.11.2023

STUDY OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF STRUCTURES OF LONG-TERM OPERATION OF THE FORMER "MODULE" PLANT IN UZHGOROD

Karkhut I.I., Ph.D., Associate Professor,
Karkhoot1@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9205-5118
National University "Lviv Polytechnic"
12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine
Luchko J.J., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Luchko.diit@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3675-0503
Lviv National Agrarian University
1, Volodymyr Velykogo str., Dublyany, 80831, Ukraine

Abstract. In this work, based on an analysis of literary scientific and technical sources and completed field studies, the problem of degradation of reinforced concrete and metal structures of long-term operation is formulated and its relevance is noted. The authors analyzed a number of works on this issue. Examples of the use of modern methods and materials for strengthening reinforced concrete and stone structures with damage and defects to restore their load-bearing capacity are described. The paper presents the results of a visual review and instrumental study of reinforced concrete and metal load-bearing structures of the former "Modul" plant, built according to the II-03c and II-60c series, as well as external self-supporting expanded clay concrete wall panels, brick walls, staircases and partitions. General information about the building and its design is provided. The objectives of the study included establishing the actual technical condition of the building's structures and the possibility of its subsequent reliable operation after repurposing. During the examination, non-destructive testing methods and laboratory tests of materials were used to obtain actual strength indicators, humidity, the degree of corrosion damage to materials, and geometric characteristics of structures for their identification. The main reasons that necessitated the research and development of recommendations for eliminating identified defects and damage, as well as shortcomings of long-term operation, have been identified. Data are provided on detected defects and damage that occurred over a long period of time. According to current standards, the general technical condition of the building has been established as satisfactory (category 2) and appropriate conclusions have been formulated regarding the need for repair work. Based on the results of field surveys, relevant calculations and conclusions, recommendations for the repair and elimination of identified defects and damage were developed.

Keywords: frames, structures, reinforced concrete, steel, walls, brickwork.

Introduction. Currently, buildings and structures play a vital role for the society of any country and have a significant impact on people's lives. The quantity and quality of modern buildings and structures erected is an objective indicator of the development of the economy of civilized states, science, culture, production and the well-being of the people. All of them must meet certain operational properties and maintain them throughout their entire service life, including through constant supervision, which in many cases is not carried out. The importance of this problem is associated, first of all, with the technical condition of buildings and structures and engineering systems built in the 70–90s and today are in mostly satisfactory technical condition. However, some of them, as a result of physical wear, have become unusable, and in some cases potentially dangerous for further use. The presence of a significant number of buildings and structures, the construction of which was stopped in the 90s, in particular due to a lack of funding and changes in production technologies, also highlights the problem of studying the residual resource when assessing the load-bearing capacity of buildings, the condition of structures and their possible repurposing. Of particular concern is the technical

condition of large-panel residential buildings, in which the design service life is expiring, and over the past 25–30 years they have experienced accelerated physical and moral aging. You should also pay special attention to one of the most important problems – housing. In particular, out of 10.4 million residential buildings in the country, 4.7 thousand are in disrepair, and 36 thousand are classified as dilapidated and unsuitable for further use. Every third building needs major or current repairs.

It is especially important that such work is necessary now, when the country faces the difficult task of restoring the building stock, which requires a significant amount of research into damaged buildings and structures and addressing the issue of ensuring the requirements for their reliable operational suitability. To improve the technical condition of buildings and structures, relevant regulations were developed and adopted by government agencies. In particular, in accordance with Article 11 of the Law of Ukraine On Architectural Activities (687-14) and resolutions of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated July 11, 2007 No. 903, the procedure for technical supervision during construction was approved. These regulations had a significant impact on the quality of construction and compliance with the requirements for the correct long-term operation of buildings and structures.

Analysis of the latest research and publications. The basis for reliable and durable operation of buildings and structures is the prevention of premature physical and moral wear and tear, as well as the elimination of damage that occurs, which is achieved by periodic inspections and preventative repairs. An analysis of scientific and technical sources [1–7] gives grounds to state that a scientific direction has been formed and developed in the research of structures of buildings and structures of long-term operation, experiencing the aggressive action of the air, soil and water environment, which is based on the research and application of modern materials and technologies

Let's consider some of them: in work [1] the main design and technological solutions for strengthening load-bearing reinforced concrete structures with concrete and reinforced concrete are outlined and highlighted. In particular, the strengthening of such structures with unloading elements is described. The main practical methods for calculating structures to be strengthened are presented. Recommendations for strengthening subsidence foundations of buildings and structures are substantiated and developed, and examples of calculations are given.

The works [2, 3] present the basic principles of technical operation and reconstruction, as well as the basics of organizing technical operation. In particular, work [2] sets out the basics of organizing the technical operation of structures of buildings and structures, presents the main fundamental issues of urban reconstruction and expedient solutions for reconstruction. Methods for modernizing buildings are also described, taking into account volumetric planning solutions, design features and technical condition. Recommendations have been developed for the repair and strengthening of structural elements using modern technologies and materials. And in work [3] the bases for organizing the technical operation of buildings and engineering structures are outlined. The features of technical operation and the feasibility of decisions on its organization, development prospects are given.

The work [4] thoroughly reflects the methods of inspection, reconstruction of buildings and structures and strengthening of their structural elements. Practical approaches to the reconstruction of buildings for various purposes are considered, taking into account the actual technical condition, as well as the technical and economic feasibility of changing the functional purpose. In particular, in work [5], based on the results of a technical inspection of industrial and civil facilities, the characteristic signs of degradation of reinforced concrete structures are summarized. The significant damage and defects identified during the inspection associated with long-term operation in the air are described. These are design errors, shortcomings and defects that were made during the construction and operation of objects using the example of reinforced concrete structures of rotating kilns at a cement plant in Nikolaev, the corrosion destruction of an overpass at the Transnistrian hydroelectric power station, the destruction of structures at the Three Concrete plant in Stryi, as well as examples of many other objects (more than 40), where the authors studied the degradation of reinforced concrete structures. Based on these studies, the main errors made at the design stage, defects and shortcomings in construction and shortcomings in the long-term operation of buildings and structures were identified. Modern technologies and materials for repair and renewal work are

also proposed.

The work [6] presents the results of studies of bridges built in Ukraine after the floods of 1998-2001 and long-term operation. Real situations are considered using the example of a monolithic frame-cantilever reinforced concrete bridge over the Tisa River in the city of Khust, destroyed during a flood in 1998 and restored in 2000.

A fragment of a map of the roadway of this bridge is shown, which shows defects - cracks that appeared after less than 2 years of operation. Instrumental control revealed a large variation in the strength of concrete during the construction of the roadway of the bridge. It was found that between some spans there is no design gap between the ends of the beams, which can have a significant impact on the stress-strain state of the structures. Also presented are the results of an examination of six steel-reinforced concrete bridges with spans of 11.8 m and 23.6 m, built after the 1998 flood in Kobyletskaya Polyana and Kosovska Polyana. The figures show the structure of the roadway of bridges during the construction period and tests for static and dynamic loads. It should be noted that the condition of these steel-concrete bridges, built in 2000, is better than those mentioned earlier, but they also have significant defects in the form of cracks.

If the examination of the above bridges revealed the low quality of their construction, then in the structural elements of long-term operation bridges we have a natural degradation of the physical and mechanical properties of the material. These data are confirmed by the example of a survey of an overpass in the city of Mukachevo, which has been in operation for 30 years. A scheme for reducing the service life of a structure is presented. In total, this work describes design errors, defects and shortcomings in the construction of long-term reinforced concrete (steel-concrete) bridges and overpasses identified by inspections.

In work [7], based on field surveys, the main problems of degradation of reinforced concrete structures of buildings and structures of long-term operation are established. Their relevance is noted. The authors drew attention to the need for systematic technical diagnostics of such structures. In particular, based on a thorough analysis of many buildings and structures of long-term operation, the reasons have been identified that significantly influence the accelerated deterioration of the operational condition of structures. They boil down to the following: errors made at the design stage, defects and deficiencies in construction, deficiencies in the operation of building structures and structures. Based on the research results, relevant conclusions are given and recommendations for carrying out repair work are given.

Works [8, 9] discuss methods for repairing reinforced concrete structures with long-term damage to ensure crack resistance, strengthening vertical and inclined sections using steel reinforcement (clamps, bends), and in work [10] using fiber, non-metallic fiber and carbon tapes etc. Some of these methods are effective when there is access along the entire height of the bending elements to inclined sections, and when access is only to the top and bottom edges, they are used to strengthen normal areas. When studying crack formation processes in bending elements [11], the appearance and development of critical inclined cracks were studied. The formation of other dangerous cracks has not been studied. Reinforced concrete elements such as slabs with inclined cracks are described in [12]. Concrete cross sections without reinforcement and with a multilayer arrangement of horizontal fasteners, which significantly increase the strength and crack resistance of inclined cross sections, were studied. In this case, the calculations took into account the dowel effect in the reinforcement [13].

The purpose of the work is to determine the actual technical condition, develop recommendations for eliminating identified defects and damage for further reliable operation based on an analysis of scientific and technical sources and field studies.

Scientific novelty and practical value. The analysis of scientific and technical literature and the results of field surveys and theoretical calculations made it possible to obtain new data on the actual stress-strain state of reinforced concrete frame structures and its changes over 40 years of operation. At the same time, the actual parameters of the depth of carbonization of concrete determined during the survey, the percentage of corrosion of working reinforcement of reinforced concrete structures and the decrease in the strength of concrete during this period of operation in the climatic conditions of

Transcarpathia were taken into account. This made it possible to establish the actual technical condition of the building's structures, taking into account the reduction in the load-bearing capacity of reinforced concrete frame elements compared to the design one, and to develop recommendations for its restoration, taking into account the repurposing of the building. The practical significance of the work is to obtain data for the development of a building reconstruction project, which made it possible to reduce construction costs and reduce its time. The presented recommendations for repairs made it possible to use modern energy-efficient materials and technologies [16], ensure the restoration of the load-bearing capacity of structures and bring them to normal technical condition (category 1).

Materials and research methods. The main load-bearing reinforced concrete, stone and steel structures of the building were examined to identify defects and damage during long-term operation, establish their danger, influence on the technical condition and its deterioration. To obtain geometric characteristics (dimensions of cross sections of steel profiles and precast reinforced concrete elements, diameters of reinforcement, thickness of the protective layer of concrete), all available non-destructive testing methods were used. The dimensions and deviations from the design position were determined by the visual method, using tape measures and a 2T-30P theodolite, Greisinger-13 tape measures were used to determine the distance, and the thickness of the protective layer of concrete, the diameter and degree of corrosion of the reinforcement of reinforced concrete elements were determined using the magnetic method (Profometer S5). The moisture content of materials was determined by the method of contact electrical conductivity (GMH 3830). The strength of welds was monitored using the ultrasonic method using дефектоскопів UD2-70 flaw detectors; the strength of concrete was determined with a 58CO181/G device. Some of the materials (bricks and mortar) were tested in laboratory conditions using hydraulic equipment (P-125 press and MP-100 tensile testing machine). All measuring instruments and testing equipment used were verified in accordance with the established procedure. The methods were certified in Ukraine and made it possible to determine the studied parameters of structures and materials with the appropriate confidence probability (at least 95%). This made it possible to reliably determine quantitative indicators of a decrease in the characteristics of structures and materials, deviations from design ones, and to establish the actual technical condition (category) of the building as a whole.

Presentation of the main research material. An inspection of the structures of a non-residential building of the former Modul plant after long-term operation was carried out to order from the building owner in accordance with Agreement No. 58-2023 dated June 06, 2023 by a team of leading experts of the private entrepreneur Karkhut I.I. The result was to determine the actual technical condition of the building's structures and develop recommendations for repairs to ensure further reliable operation after its repurposing.

The objectives of the survey included a visual inspection of the main load-bearing and enclosing structures: roofs and roofs, reinforced concrete roofing and floor slabs, columns and crossbars of frames, steel frames and braces, brick walls and partitions, concrete foundations in order to identify and establish the causes of defects and damage, disadvantages of long-term use. Based on the analysis of the survey results and calculations, it is necessary to establish the actual technical condition, check the load-bearing capacity and develop recommendations for eliminating defects and damage during reconstruction.

Structural solution of the building. The building consists of three sections. The building of section 1 is rectangular in plan with axial dimensions of 36×24 m, three-story with a technical floor and a shelter in the basement, built in the late 1960s. Section 1 is interlocked with section 2. The frame is reinforced concrete according to series II-03c. The pitch and runs of the crossbars are 6 m in the axes. The height of the first and second floors is 3.3 m, the third floor is 4.2 m. Frame columns with a cross section of 300×300 mm with rectangular consoles. Ribbed coating slabs 300 mm high. Slabs in interfloor ceilings of type PK-57-15-8A-III, ordinary and connected. The overlay of the shelter in the basement is reinforced concrete monolithic ribbed with concrete walls. External self-supporting walls made of expanded clay concrete panels measuring 6×1.2×0.24m. The foundations of the shelter under the building are columnar on a natural basis. More detailed data on the design of section 1 are given in [14]. Sections 2 and 3 in a complete prefabricated reinforced concrete frame according to

series II-60c. The floors are prefabricated reinforced concrete, external self-supporting walls are made of expanded clay concrete panels and brickwork 380 mm thick. Section 2 is interlocked with L-shaped section 3. The building sections are three-story (four-story) with shelters in the basements. The section structures are made in the form of transverse prefabricated multi-storey frames with a pitch of 6 m. The grid of columns is 6×9 m. The frame crossbars are continuous with purlins of 9 m in the axes. The total length of the sections in plan is 102 m between the axes, width 36 m. The second and third sections were built in 1976. The height of the 2nd and 3rd floors is 4.8 m, the first floor is 6 m. The columns of the first floor along the middle axes are 600×400 mm in section, the upper floors are 400×400 mm. Columns of the outer axes with a cross-section of 450×400 mm. More detailed data of the 2nd and 3rd sections are given in [8].

Field inspections of the structures of the Module plant in Uzghorod revealed:

Section 1. During a visual inspection, traces of slight penetration of moisture between the covering and floor slabs and cracks in the seams of the slabs were found. The causes of the detected defects and damage were leaks from the roof during the long-term operation of the flat roof before repair for about 30 years.

The defects found in the enclosing structures are as follows: leaks in the joints of sheets of profile flooring, leaks in junctions with walls and in ridges. Destruction of the brick walls of the staircases was detected to a depth of 30–40 mm due to periodic freezing (Fig. 1, a). Corrosion of metal structures of frames on the technical floor is insignificant (local) and uniform on the surface. The technical condition of the metal structures is satisfactory.

The main defects and damage to the shelter structures under Section 1, identified during the inspection, are minor corrosion damage to the floor structures and self-supporting walls, in particular corrosion of reinforcement clamps, violation of the tightness of the waterproofing of walls and foundations, cracks in the protective layer of concrete up to 0.20 mm and in individual places 0.3–0.4 mm along the working reinforcement.

The overlap of the shelter is reinforced concrete monolithic ribbed. The main defects and damages detected during visual inspection are the following: cracks on the surface of the slab up to 0.3 mm wide (Fig. 1, b), carbonization of concrete to a depth of up to 15 mm and a decrease in the strength of concrete up to 15–20% (Fig. 1, b). Photographic recording of defects, damage and shortcomings of long-term operation is shown in Fig. 1 and in work [14]. It should be noted that the detected defects and deficiencies are located in separate areas of the floor slab and column capitals without a clearly defined system (Fig. 1, e). In our opinion, the main reason for their occurrence and development was prolonged flooding of the shelter.

Consequently, in terms of the totality of defects and damage from long-term operation, the technical condition of the load-bearing structures of the shelter floor according to the classification of current standards is satisfactory and in order to bring them to normal technical condition they need to be repaired with the elimination of identified defects.

Thus, according to the definition of tables [15], the condition of the load-bearing and enclosing structures of Section 1, taking into account the repairs carried out at the time of the inspection (06.06.2023), can be qualified as satisfactory. In this condition, there are no defects or damage that could reduce the durability of structures and their performance.

Sections 2 and 3. When conducting a full-scale inspection of the structures of Sections 2 and 3, the following defects and shortcomings of long-term operation were identified: significant defects in the roof, in particular leaks and cracks in the seams of the rolled covering, blockage of water intake funnels, which leads to stagnation of water on the surface (photo [14]). The technical condition of the waterproofing carpet is unsatisfactory.

The soaking of reinforced concrete structures in leakage areas is significant. Local destruction of the protective layer of concrete and minor corrosion of the working reinforcement were revealed, but further soaking can worsen the technical condition of the load-bearing reinforced concrete structures of the coating, floor and frame as a whole. There are no defects in the ceiling and frame in the form of excess cracks with an opening width of more than 0.3 mm. The technical condition of reinforced concrete and steel structures can be assessed as satisfactory.



Fig. 1. 1. Degradation of structures of buildings of the former Modul plant in Uzhgorod: *a* – destruction of the masonry walls of the staircase made of brickwork to a depth of 50 mm in Section 2 from periodic freezing and thawing; *b* – traces of flooding of the shelter to a height of 2 m in the basement of Section 1 (carbonization of concrete and reduction in concrete strength); *c* – cracks along the edge of the floor slab on the third floor of Section 2 (corrosion of the working reinforcement in the edge of the slab); *d* – cracks in the rib of the floor slab on the second floor of Section 2 (destruction of the protective layer of concrete, carbonization of concrete, peeling of the protective layer, corrosion of the reinforcement of the floor slab and capital); *f* – periodic flooding of the shelter in the basement of Section 2, resulting in the appearance of damage shown in Fig. 1 *a–f*

In brick partitions and walls in some places where soaking occurred, minor destruction of the masonry up to 20 mm was found. In the walls of staircases, destruction is caused by local freezing and thawing to a depth of 40-50 mm (Fig. 1, *a*). Minor defects were also identified in the form of loss of mortar from masonry joints of walls and partitions, which have a local effect on the load-bearing capacity of structures.

In the shelter under Sections 2 and 3, the main defects discovered during the inspection were the complete destruction of the equipment of engineering systems and stone brick partitions as a result of flooding (Fig. 1 and work [14]). The floor is prefabricated monolithic. The main structural defects detected during a visual inspection are the following: cracks in concrete walls and floor slabs with an opening width of mainly up to 0.25 mm, and in some places up to 0.35 mm (Fig. 1, *c, d, e*); penetration of moisture through cracks in structures.

Carbonization of the concrete of floor slabs, columns and capitals in the shelter, and peeling of the protective layer of concrete were revealed (Fig. 1, *c, d, e*). Corrosion of mounting and

working reinforcement was detected in the ribs of floor slabs and columns and capitals, corrosion of embedded parts (Fig. 1 *c, d, e*) and surface corrosion of concrete.

As a result of a visual inspection, damage and shortcomings of long-term operation were identified and localized, and their descriptions were made. All detected defects as of June 26, 2023 generally have a local effect on reducing the strength and rigidity of individual load-bearing structures and can be eliminated during repair work. The general technical condition of the 2nd and 3rd Sections of the building according to the classification tables [15] is satisfactory, taking into account the reduction in the level of loads during repurposing. Structures require ongoing repairs to eliminate detected defects and damage. It is recommended to eliminate detected defects and damage to load-bearing reinforced concrete structures using modern materials and technological solutions given in [16].

Instrumental examination of load-bearing structures. An instrumental examination was carried out to establish the actual physical and mechanical characteristics of the masonry and concrete structures, the position and diameter of the reinforcement of reinforced concrete elements necessary to perform verification calculations and establish compliance with regulatory requirements. In addition, the degree of development of defects (cracks) and their parameters were determined to determine the effect on the load-bearing capacity of structures. A list of instruments used for instrumental examination and determination of geometric dimensions, crack opening and characteristics of materials of load-bearing structures is given in [14].

During the survey, the geometric parameters of reinforced concrete structures of coating and floor slabs of series II-03c and II-60c were determined, in particular the location of class A-III reinforcement in them. The average deviation values from 3–5 measurements turned out to be close to the normalized ones. Measurements of the dimensions and defects of panel and brick walls and partitions of sections, load-bearing walls of staircases and ventilation shafts with a thickness of 250–380 mm were carried out. Vertical and inclined power cracks in the masonry and panels were not detected. Weathering and loss of mortar from the joints was recorded in small areas, the depth of destruction of the masonry due to thawing was up to 40 mm.

The strength of materials was determined using a non-destructive method to perform verification calculations during reconstruction (Table 1). The strength of brickwork and mortar was determined using samples taken from the masonry in accordance with the requirements of current regulatory documents. Protocols based on the results of determining the strength of mortar and brick are given in [14].

Table 1 – Results of testing the strength of materials of load-bearing structures

No.	Name	Strength characteristics		
		Actual, Section 1	Actual, Sections 2 i 3	Design
1	Monolithic sections of the floor	M350	M250-M300	C20/25
2	Hollow slabs	M250-M300	-	C20/25
3	Ribbed slabs	-	M250-M300	C20/25
4	Columns 300×300 mm	M400	-	C25/30
5	Columns 400×400 mm	-	M450	C30/35
6	Columns 400×600 mm	-	M450	C30/35
7	Columns 450×400 mm	-	M450	C30/35
8	Girders 6 M, 9 M	M400	M400	C30/35
9	Wall panels	M300	M300	C20/25
10	Flights of stairs	M300	M300	C20/25
11	Lintels	M300	M250-M300	C12/15
12	Facade racks	M300	M300	C20/25
13	Porotherm blocks	M150	M150	M150
14	Solid ceramic brick	M75-M100	M75-M100	M75
15	Construction mortar	M75	M75	M75

Consequently, when conducting an instrumental examination, non-destructive methods were used: magnetic to determine the diameter, position and degree of corrosion of the reinforcement; surface impact to determine the strength of concrete; surface contact for determining the moisture content of concrete, reinforced concrete structures and brickwork. The strength of masonry walls and partitions: masonry mortar, brick, hollow blocks, was determined in laboratory conditions using a P-125 press and an MP-100 tensile testing machine. The characteristics determined in this way made it possible to clarify the nature and extent of damage and the technical condition of all structures. Certain characteristics of structures and materials from visual and instrumental examination are given in [14].

Conclusions. The analysis of scientific and technical sources and a number of field surveys and theoretical studies, visual and instrumental examination of the load-bearing and enclosing structures of the building and shelter in the basements, life support systems, and verification calculations allow us to draw the following conclusions:

1. The degree of development of the identified defects at the time of the survey (06/06/2023) allows us to unequivocally state that they do not significantly affect the load-bearing capacity of the main structures of all sections of the building and shelter, taking into account the reduction in the level of loads during repurposing.

2. The physical and mechanical characteristics of the materials of the load-bearing structures of the inspected building have deteriorated during the period since commissioning. Their load-bearing capacity decreased slightly (up to 20%) compared to the design one. But in general, they meet the minimum requirements of current standards, including those for construction in areas of high seismic activity.

3. The technical condition of the inspected load-bearing structures is satisfactory (category 2) and their load-bearing capacity under actual loads after repurposing is ensured. The technical condition of the shelter's life support systems is emergency, and they need to be completely replaced. The physical wear and tear of the shelter structures is 24% – the condition is satisfactory and their repair is economically feasible.

4. Maximum calculated vertical loads on the columns of the first floor frames: columns 300×300 mm – 1.40 MN, columns 600×400 mm – 4.20 MN, columns 450×400 mm – 3.15 MN. It is possible to reconstruct a building with a superstructure in accordance with the presented proposals while maintaining the frame-braced structural scheme without reinforcing the load-bearing structures of frames, walls and overlaps.

5. Enclosing structures must be lightweight to reduce forces from seismic influences. If it is necessary to fill cavities and level floor marks, it is recommended to use expanded polystyrene concrete screeds with a specific gravity of 400-500 kg/m³. Partitions should be made of hollow materials or frame type. External walls and filling of openings should be brought into compliance with energy efficiency requirements. Staircases must be brought into compliance with the requirements of current standards. Existing timber roof structures must be dismantled. All layers of flat roofs with insulation that are unsuitable for use should be removed and replaced with energy efficient ones. All internal networks of the inspected sections of the building and the life support systems of the shelters are also subject to replacement.

6. After selecting materials for the superstructure, check the load-bearing capacity of columns and girder frames to make a final decision regarding the need to strengthen them. The renovation project must be carried out by certified professionals. Before dismantling begins, it is necessary to fence off the building and carry out work in compliance with safety requirements in construction. The accepted level of reconstruction is "a" "restoration of the condition of structures to the level prior to damage" according to DBN V. 1.1–12:2014 "Construction in seismic regions of Ukraine".

References

- [1] A.B. Golyshev, P.I. Krivosheyev, P.M. Kozeletskiy i dr., *Usileniye nesushchikh zhelezobetonnykh konstruksiy proizvodstvennykh zdaniy i prosadochnykh osnovaniy*. Kyiv: Logos, 2004.
- [2] A.I. Havrylyak, I.B. Bazarnyk, R.I. Kinash i in. *Tekhnichna ekspluatatsiya, rekonstruktsiya i modernizatsiya budivel'*. NU «L'vivs'ka politekhnika», 2006.
- [3] A.I. Havrylyak, *Osnovy tekhnichnoyi ekspluatatsiyi budivel' ta inzhenernykh system*. NU «L'vivs'ka politekhnika», 2009.
- [4] I.H. Ivanyk, S.I. Vikhot', R.S. Pozhar i in., *Osnovy rekonstruktsiyi budivel' i sporud*. Lviv, NU «L'vivs'ka politekhnika», 2010.
- [5] J.J. Luchko, "Osnovni faktory seredovyshcha, yaki vplyvayut' na dehradatsiyu transportnykh sporud iz zalizobetonnykh i metalevykh hofrovanykh konstruksiy", *Teoriya i praktyka rozvytku ahropromyslovoho kompleksu ta sil'kykh terytoriy: metarialy XXII Mizhnarodnoho naukovo-praktychnoho forumu*, 2021, vol. 2, pp. 203-206.
- [6] J.J. Luchko, I.I. Karkhut, I.B. Kravets, "Doslidzhennya zbudovanykh mostiv yaki buly zruynovanykh povenyamy na Ukrayini v 1998 i 2001 rokakh ta tryvaloyi ekspluatatsiyi, Mosty i tuneli: Teoriia, doslidzhennia, praktyka", vol. 20, pp. 26–38, 2021.
- [7] J. Luchko, B. Nazarevich, V. Kovalchuk, "Degradating concrete and reinforced building structures and long-term structures", *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, Issue 86, pp. 35–46, 2022.
- [8] I. I. Karkhut, *Obstezhennya zavodu «Modul'» ta rekomendatsiyi z podal'shoyi nadiynoyi ekspluatatsiyi*. Lviv, FOP Karkhut I.I., 2023.
- [9] S. Maksymovych, O. Krochak, I. Karkhut, R. Vashkevych, "Experimental Study of Crack Resistance and Shear Strength of Single-Span Reinforced Concrete Beams Under a Concentrated Load at $a/d=1$ ", *Proceedings of EcoComfort 2020*, vol. 100, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_34.
- [10] Z.Ya. Blikharsky, I.I. Karkhut, *Calculation and design of bent reinforced concrete elements*. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politehniky, 2017. <https://vlp.com.ua/node/20235>.
- [11] Z. Blikharsky, R. Khmil, P. Vegera, "Shear strength of reinforced concrete beams strengthened by PBO fiber mesh under loading", In *MATEC Web of Conferences*, vol. 116, 02006, 2017. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602006>.
- [12] T. Bobalo, Y. Blikharsky, R. Vashkevych, M. Volynets, "Bearing capacity of RC beams reinforced with high strength rebars and steel plate", *MATEC Web of conferences*, vol. 230, 02003, 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002003>.
- [13] J. Selejdak, Y. Blikharsky, R. Khmil, Z. Blikharsky, "Calculation of Reinforced Concrete Columns Strengthened by CFRP", *Proceedings of CEE 2019. CEE 2019*, vol. 47. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_51.
- [14] Y. Blikharsky, R. Khmil, Z. Blikharsky, "Research of RC columns strengthened by carbon FRP under loading", *MATEC Web of conferences*, 174, 04017, 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817404017>.
- [15] DSTU-N B V.1.2-18-2016. Nastanova shchodo obstezhennya budivel' i sporud dlya vyznachennya ta otsinky yikh tekhnichnoho stanu. K.: DP «UkrNDNTS», 2017.
- [16] J.J. Luchko, B.Z. Parneta, B.L. Nazarevych, *Metody zakhystu vid koroziyi zalizobetonnykh konstruksiy i sporud*. Lviv. Kamenyar, 2016.

**ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ТРИВАЛОЇ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОЛИШНЬОГО ЗАВОДУ «МОДУЛЬ» У М. УЖГОРОДІ**

Кархут І.І., к.т.н., доцент,
Karkhoot1@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9205-5118
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна

Лучко Й.Й., д.т.н., професор,
Luchko.diit@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3675-0503
Львівський національний аграрний університет
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, 80831, Україна

Анотація. У даній роботі на основі аналізу літературних науково-технічних джерел та виконаних натурних досліджень сформульовано проблему деградації залізобетонних і металевих конструкцій тривалої експлуатації та відзначено її актуальність. Авторами проаналізовано низку робіт із вказаної проблематики. Описано також приклади застосування сучасних методів та матеріалів для підсилення залізобетонних та мурованих конструкцій з пошкодженнями і дефектами для відновлення їх несучої здатності. В роботі представлено результати візуального огляду та інструментального дослідження залізобетонних і металевих несучих конструкцій колишнього заводу «Модуль», побудованих за серіями П-03с і П-60с, а також зовнішніх стінових самонесучих керамзитобетонних панелей, цегляних стін, сходових кліток та перегородок. Наведено загальні відомості про будівлю та її конструктивне рішення. В задачі дослідження входили встановлення дійсного технічного стану конструкцій будівлі та можливості її подальшої надійної експлуатації після перепрофілювання. При обстеженні застосовані методи неруйнівного контролю та лабораторні дослідження матеріалів для отримання фактичних показників міцності, вологості, ступеня корозійного пошкодження матеріалів, геометричних характеристик конструкцій для їх ідентифікації. Встановлені основні причини, які викликали необхідність дослідження та розробки рекомендацій з усунення виявлених дефектів і пошкоджень, недоліків тривалої експлуатації. Наведені дані про виявлені дефекти і пошкодження, що виникли протягом тривалого терміну. Згідно чинних норм встановлено загальний технічний стан будівлі – задовільний (категорія 2), та сформульовані відповідні висновки щодо необхідності проведення ремонтних робіт. На основі результатів натурних обстежень, відповідних розрахунків та висновків були розроблені рекомендації з ремонту та усунення виявлених дефектів і пошкоджень.

Ключові слова: каркаси, конструкції, залізобетонні, сталеві, стіни, цегляна кладка.

Стаття надійшла до редакції 28.10.2023

ANALYSIS OF THE EFFECT OF UNEVEN DAMAGE OF REINFORCED CONCRETE BEAM USING THE FEMAP SOFTWARE PACKAGE

¹**Mykhalevskyi N.A.**, PhD student,
nazarii.a.mykhalevskyi@lpnu.ua, ORCID: 0009-0007-8107-7892
¹**Vegera P.I.**, PhD, Associate Professor,
pavlo.i.vehera@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-3437-1825
¹**Blikharskyi Z.Y.**, Doctor of Engineering, Professor,
zinovii.y.blikharskyi@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-4823-6405,
¹*Lviv Polytechnic National University*
Karpinskoho Street, 6, Lviv, 79013, Ukraine

Abstract. In most buildings and structures, reinforced concrete elements, which are operated with various damages and defects, are used. This article presents the results of theoretical studies of unevenly damaged reinforced concrete beams using the FEMAP software package. The occurrence of defects and damages leads to the danger of operation of buildings and structures, changes in the stress-strain state, and can lead to a decrease in the stiffness and bearing capacity of the structure. Defects and damages occur under the influence of the external environment, mechanical impacts, aggressive environment, and because of an explosion. The study aimed at analyzing the effects of the occurrence of uneven damage to reinforced concrete beams is of great practical importance in the future calculation of the residual bearing capacity and determination of the stress-strain state of a reinforced concrete element. Therefore, for theoretical studies, we use the finite element modeling of reinforced concrete elements in the FEMAP software package. The simulations were performed with different types of damage caused by wetting, alternating freezing, and thawing, and the stresses in concrete and reinforcement were analyzed using the finite element method (FEM), which is an effective numerical method for solving engineering problems. Based on the modeling results, the stresses were compared with the ultimate stresses, and the deformability of unevenly damaged reinforced concrete beams was determined. The results of the theoretical studies can be used in the future for practical experiments and are of practical importance in choosing the optimal method for calculating the residual bearing capacity of a reinforced concrete element. The importance of this study lies in its potential ability to improve the safety of building structures and reduce the risk of hazards during the operation of structures. The effectiveness of the FEM method, combined with these results, opens up new opportunities for engineers and researchers and can serve as a basis for improving the methods of calculating reinforced concrete elements under load using the latest finite element modeling technologies.

Keywords: damage, reinforced concrete beams, FEMAP, deformability.

Introduction. Determination of the residual load carrying capacity of reinforced concrete beams under various damages is an urgent task for the construction industry and is of great importance for design engineers. Damage to concrete can occur for various reasons, such as chemical attack, mechanical damage, improper operation, and other types of damage classified in [1]. This can lead to a decrease in the bearing capacity of beams and an increase in the risk of accidents, as well as to the occurrence of complex types of deformations of reinforced concrete elements that are not predictable in the design [2].

Research in this area is aimed at understanding the mechanisms of damage and its impact on the bearing capacity of reinforced concrete beams. The results of such studies can be used to set safety standards and develop recommendations. Accordingly, the assessment of the technical condition of reinforced concrete structures is the main diagnostic tool during operation, so there is a need to determine the bearing capacity and selecting the optimal reconstruction method.

This article discusses the stress analysis and deformability of reinforced concrete beams with non-uniform damage using the Femap software package based on NX Nastran.

Analysis of recent research and publications. The study of reinforced concrete beams with damage is a relevant area. When the compressed zone of concrete is damaged, the bearing capacity of the beam decreases, deformations and stresses change. Determination of the bearing capacity of reinforced concrete beams with damage to the compressed zone is investigated in [3].

The use of numerical analysis of the effect of damage to the compressed zone of concrete in a reinforced concrete beam provides important information for understanding the behavior and prediction of performance. Numerical methods are used to analyze the effect of concrete damage on the bearing capacity of beams and to study the mechanical characteristics of such structures.

Having considered the papers [4-5], which investigate the influence of cracks in the concrete compressed zone on the bearing capacity of reinforced concrete beams and their impact on the mechanical characteristics of structures. These articles are substantiated by numerical and experimental research methods. The main attention is paid to the analysis of the effect of cracks on the change in the bearing capacity of beams, in particular, various factors such as the depth and length of cracks, reinforcement, and material properties are taken into account. The results of the study of crack formation and failure of the concrete compressed zone contribute to a better understanding of this effect on the performance of reinforced concrete beams and its bearing capacity. In [6], typical flexural failure was observed in damaged beams. Bending cracks increased and propagated upward in the high moment region with increasing load. After reaching the yield strength, an upward shift of the neutral axis was observed, which led to concrete crushing in the compressed zone. Small inclined cracks of minor impact appeared throughout the span.

Klymenko E.V. [7] carried out the study of damaged reinforced concrete elements, the main direction of work was to create the basis for a methodology for determining the technical condition of damaged reinforced concrete structures and assessing the possibility of their further normal operation based on field tests. During the operation of reinforced concrete elements, there was a need to protect the bearing structures of the eastern stand of the stadium from atmospheric moisture. Prolonged soaking of reinforced concrete structures led to the destruction of the cover, corrosion of the longitudinal and transverse reinforcement. These damages necessitated the determination of the bearing capacity and deformed state.

The analysis of the stress-strain state and the determination of the residual bearing capacity of reinforced concrete elements using the FEMAP software package were performed in [8]. The basis for the research work was significant damage to reinforced concrete elements, errors in the manufacturing technology, non-compliance with the minimum cover, violations of the formwork geometry, and installation deviations. The objective of the study was to systematize the approach and factors that influence the decision-making process for strengthening a damaged reinforced concrete element, as well as to analyze the factors that influence the process of modeling an existing reinforced concrete element in order to determine the actual bearing capacity.

The most modern methods of modeling reinforced concrete structures using FEMAP and NASTRAN software are proposed by S. Kumar [9]. The author discusses methods of modeling, analysis and design of reinforced concrete elements and describes the process of creating models, determining loads, performing analysis and evaluating the bearing capacity and stability of reinforced concrete structures. The author also discusses in detail the use of software products for calculations and optimization of structures. The final results confirm that Femap and NASTRAN can be useful tools for modeling reinforced concrete structures and analyzing their behavior.

Among the publications, a broad overview of modeling and analysis of a reinforced concrete beam using the FEMAP software package is presented in [10]. In particular, the authors describe the methodology for constructing a geometric model, the correct input of material properties, and loading conditions. The process of analyzing a reinforced concrete beam with setting up boundary conditions and performing numerical analysis. Examples of modeling and analysis of reinforced concrete beams are presented to demonstrate the effectiveness of Femap and NASTRAN. The results indicate that these software products can be used to determine stresses and strains.

Research objective. Modeling of reinforced concrete beams with non-uniform damage under load in the Femap complex using the finite element method. Based on the modeling, to analyze stresses and strains.

The object of research is reinforced concrete bending structures of buildings and structures under conditions of long-term operation.

Materials and methods of research. For theoretical research and modeling, a normally reinforced concrete beam was designed, which will be used for experimental testing and comparison of the results with theoretical data. The geometric dimensions of the reinforced concrete beam are: length $l=2100\text{mm}$, height $h=200\text{mm}$, width $b=100\text{mm}$, distance between supports $l_1=1900\text{mm}$. The working reinforcement in the tensile zone of the beam is designed from rolled steel $\text{Ø}16\text{A}500\text{S}$ (Young's modulus $E=209200$, Poisson's ratio = 0.29), upper reinforcement $2\text{Ø}6\text{A}240\text{C}$, concrete of class C30/35 (Young's modulus $E=34500$, Poisson's ratio = 0.21). The transverse reinforcement is made in the form of U-shaped clamps $\text{Ø}6\text{A}240\text{C}$ with a pitch of 75 mm (Fig. 1).

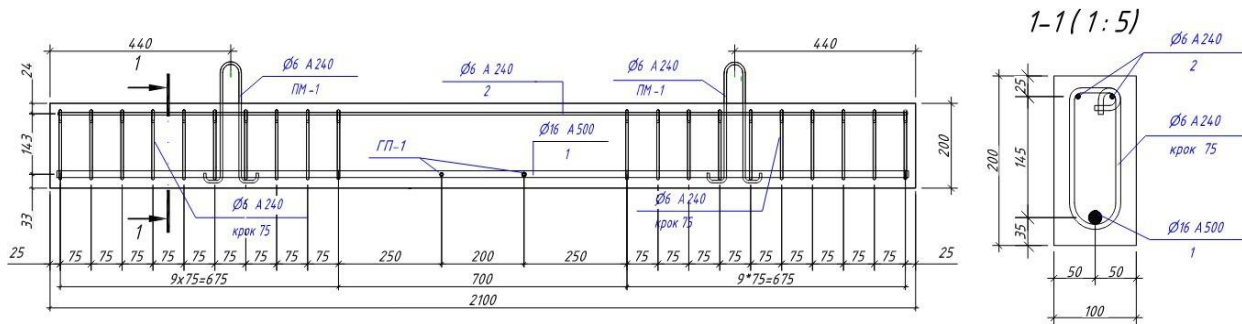


Fig. 1. General view of beam reinforcement

The reinforced concrete beam was designed to be installed on the test bench in such a way that its failure is expected in the zone of pure bending. To create the model and perform the calculations of the reinforced concrete beam, I used Femap, a widely used and modern software package for engineering analysis that facilitates the construction of finite element models.

The modeling starts with creating the necessary layers and entering the parameters of concrete and steel – Young's modulus, Poisson's ratio (Fig. 2).

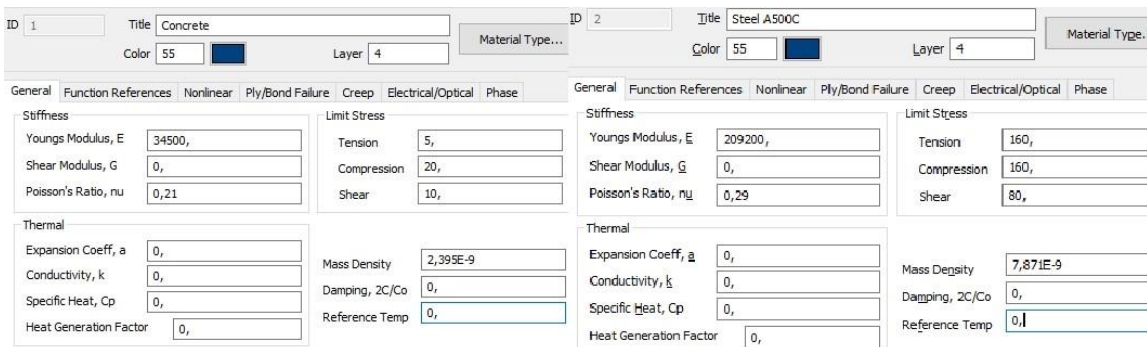


Fig. 2. Characteristics of reinforced concrete beam materials

The next step was to create a finite element mesh. To ensure the compatible operation of the reinforced concrete element, the modeling was performed with the condition that the edges and nodes of the concrete finite element mesh coincide. Formation of the element mesh included the creation of a plane from which finite elements were created using the "extrude" method along the entire length of the beam. To obtain accurate data, the finite element mesh was created from $10 \times 10\text{mm}$ and $15 \times 10\text{mm}$ cubes. The reinforcement was modeled using the BEAM element. After completing the mesh creation, all model nodes need to be merged using the "merge coincidence" command, which removes all unnecessary nodes and solves the problem of errors during the subsequent calculation of a damaged reinforced concrete beam.

After that, we create supports at a distance of 100 mm from its edge in the lower nodes of the beam along its entire width. On the one side – fixed support with a ban on movement along the TX, TY, TZ axes. The load with the value F (kN) is applied in 1/3 of the span (Fig. 3) to ensure a clean bending zone. The applied load $F = 35.3$ kN.

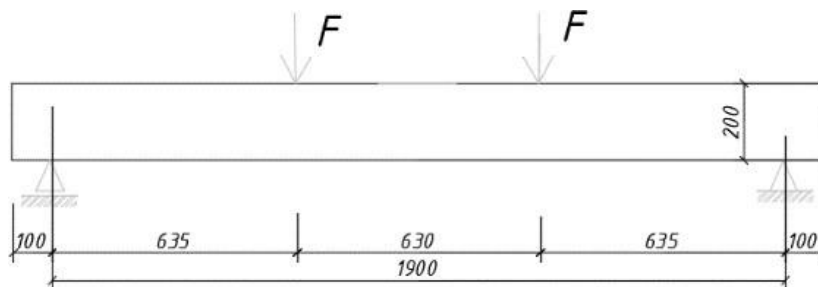


Fig. 3. Scheme of load application

For further study and analysis of a reinforced concrete beam with uneven damage, 6 variations of damage with variable values were selected and modeled (Fig. 4). The damage parameters are the following values:

- depth;
- is the damage angle α ;
- is the value of the slice run Δa .

Damage may occur as a result of wetting or alternating wetting, freezing and thawing.

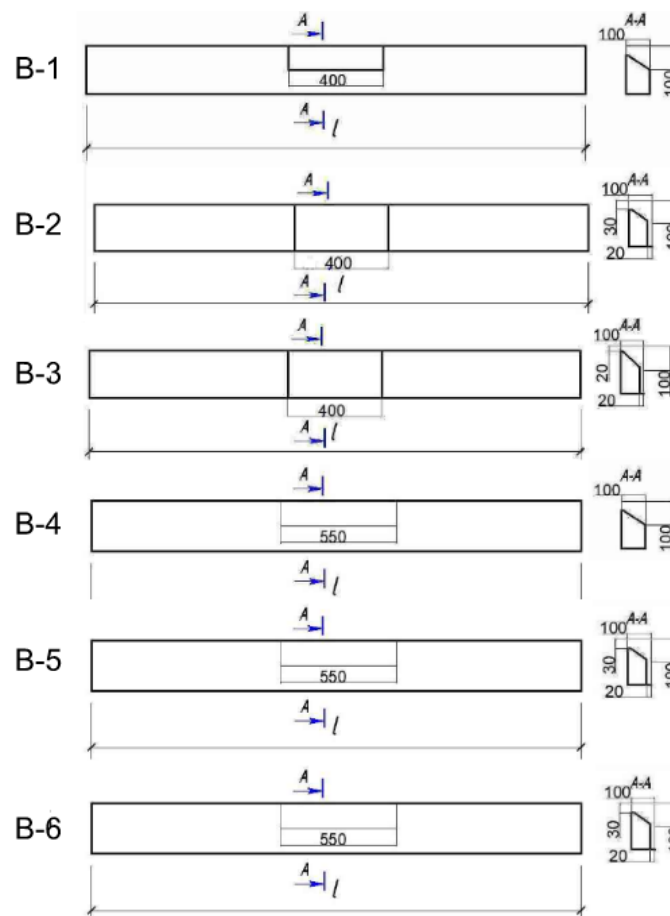


Fig. 4. Scheme of damage to a reinforced concrete beam

There are several ways to create a computational model fault in the FEMAP program [10], in this case, we chose to create it by deleting mesh elements. After deletion, the "merge coincidence" command must be used again to prevent errors. It is assumed that this damage may cause a change in the stress-strain state of the reinforced concrete element. As a result of modeling and static calculation using the Femap software, models and isofields of the reinforced concrete beam B-1 (Fig. 5, Fig. 6), displacements in the Y-axis (Fig. 7) and along the X-axis (Fig. 8) were obtained.

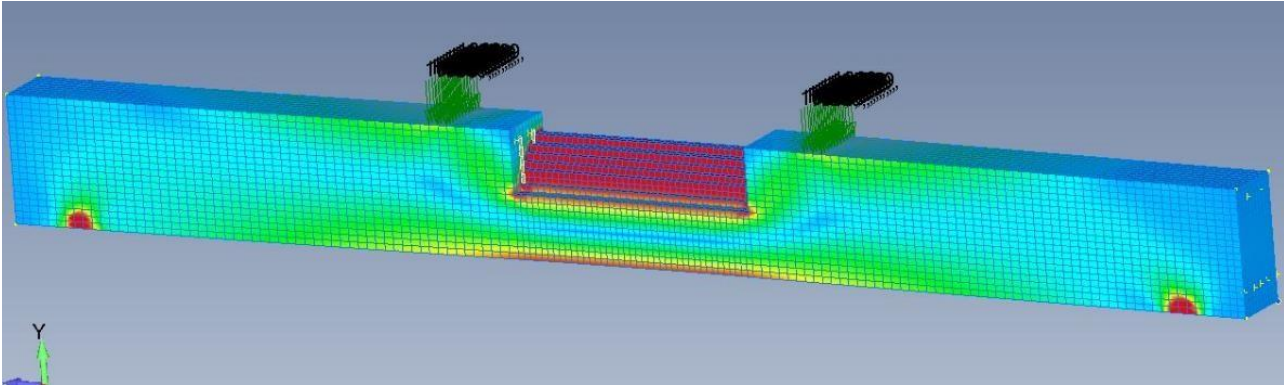


Fig. 5. General view of damage and stress isopleth of concrete of beam B-1

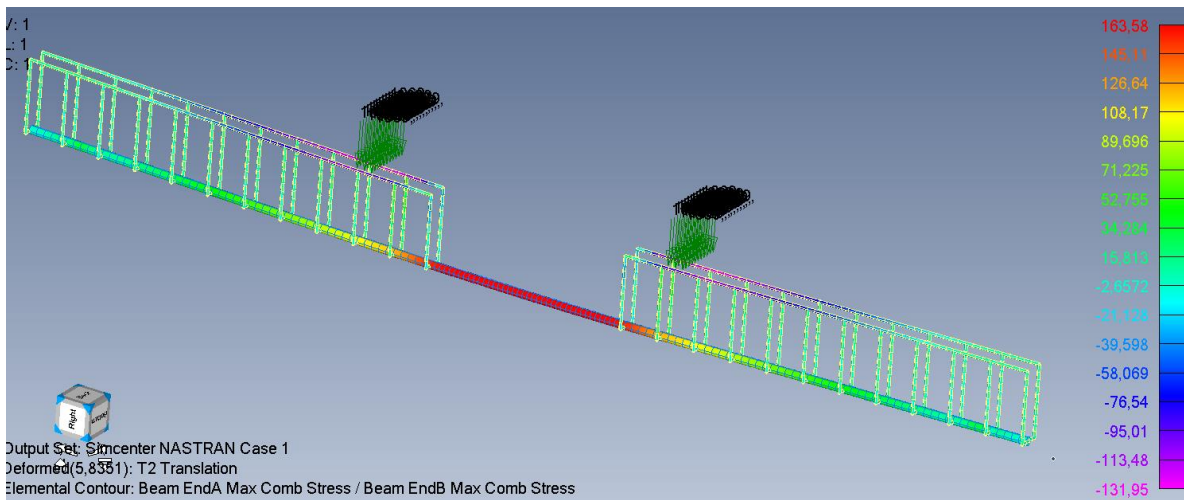


Fig. 6. Stress isofields in the reinforcement of beam B-1

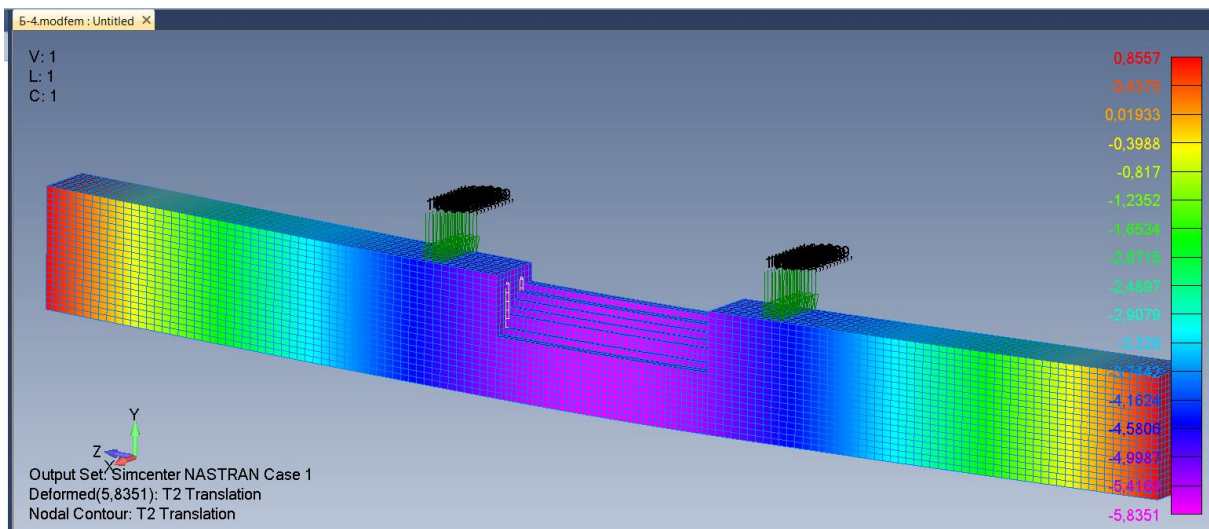


Fig. 7. Movement of the damaged beam B-1 along the Y-axis

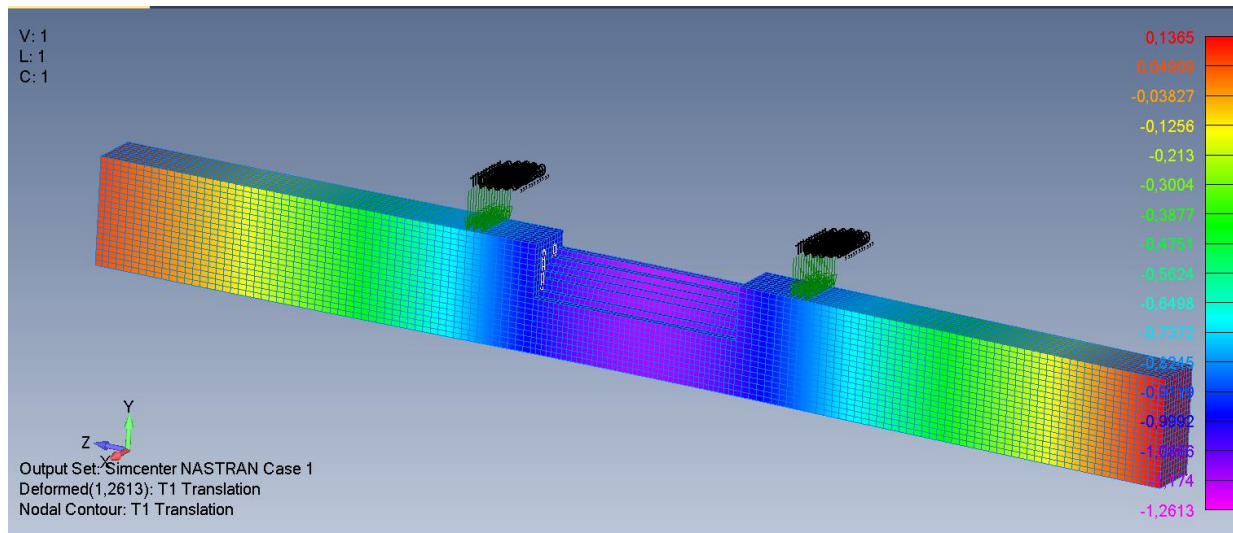


Fig. 8. Movement of the damaged beam B-1 along the X-axis

The theoretical results of unevenly damaged reinforced concrete beams are shown in Table 1. The analysis of these data allows us to understand which of the damage parameters can play a role in increasing the deformation under the load.

Table 1 – Summary indicators of damaged reinforced concrete beams

Title	Damage angle	Depth of damage	Length of the cut	Displacement along the Y-axis	Displacement in the X-axis	Max stress in concrete σ_c	Max stress in the reinforcement σ_s
B-1	45°	100mm/100mm	400 mm	5.83mm	1.26mm	37.5 kN	135.58 mPa
B-2	30°	-	400 mm	6.29mm	1.44mm	40.5kN	146.42 mPa
B-3	45°	-	400 mm	7.06mm	2.03mm	45.36 kN	156.4 mPa
B-4	45°	100mm/100mm	550 mm	6.41mm	1.4mm	41.23 kN	142.21 mPa
B-5	30°	-	550 mm	6.97mm	1.6mm	44.52kN	158.3 mPa
B-6	45°	-	550 mm	7.91mm	2.3mm	49.28 kN	167.7 mPa

Conclusions and Prospects for Further Research. Having analyzed the data obtained in the course of the work, the following conclusions can be drawn:

1. The use of finite element modeling of existing reinforced concrete elements will allow obtaining accurate results compared to analytical methods.
2. The theoretical study of unevenly damaged reinforced concrete beams in the FEMAP software environment allows us to study in detail the stresses in concrete and reinforcement under different variations of damage, to analyze displacements depending on the damage parameters. The results demonstrate the impact of the compressed zone on the reinforced concrete beam, as each centimeter of damage reduces the effective working height of the concrete, its bearing capacity, and changes the inclination of the neutral axis.
3. The modeling makes it possible to assess the impact of damage to elements and defects that occur in existing building elements under load.
4. We can conclude that this study is not complete and requires further refinement and comparison of theoretical results with experimental data.

References

- [1] O.P. Voskobiinyk, "Typological comparison of defects and damage of reinforced concrete, metal and steel-reinforced concrete beam structures", *Theory and building practice*, no. 662, pp. 97-103, 2010.
- [2] O.P. Voskobiinyk, O.O. Kitaiev, Ya.V. Makarenko, Ye.S. Buhaienko, "Experimental investigation of reinforced concrete beams with defects and damages that cause the skew bending", *Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, no. 1(29), pp. 87-92, 2011.
- [3] Ye.V. Klymenko, K.V. Polianskyi, "Experimental investigation of the stress-strain state of damaged reinforced concrete beams", *Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, no. 76, pp. 24-30, 2019.
- [4] X. Zhang, S. Li, Z. Yao, S. Zhao, & C. Wang, "Influence of cracks in the compressed zone on the strength and stiffness of reinforced concrete beams", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, pp. 804-816, 2018.
- [5] S. Li, N. Zhang, & I. Zhao, "Influence of cracks in the compressed zone on the strength of reinforced concrete beams", *Journal of Structural Engineering*, no. 144(6), 2018.
- [6] R.H. Haddad, M.J. Shannag, A. Moh'd, "Repair of heat-damaged RC shallow beams using advanced composites", *Materials and Structures*, no. 41, pp. 287-299, 2008.
- [7] Ye.V. Klymenko, V.V. Pohribnyi, O.O. Dovzhenko, "Deformovanyi ta tekhnichni stan nesuchykh konstruktzii stadionu «Vorskla» v m.Poltavi", *Kommunalnoe khoziaistvo horodov*, vol. (55), pp. 319-324, 2004.
- [8] V.K. Shynder, M.V. Lobzin, "Analysis by mathematical modeling of carrying capacity of existing residual structural elements during reinforcement", *Theory and building practice*, no. 877, pp. 231-234, 2018.
- [9] S. Kumar, "Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Using Femap and NASTRAN", *International Journal of Structural Analysis & Design*, no. 7(4), pp. 104-110, 2020.
- [10] H. Zhang, G. Li, "Modeling and Analysis of Reinforced Concrete Beams in Femap and NASTRAN", *Journal of Structural Engineering*, no. 145(6), 04019039, 2019.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ НЕРІВНОМІРНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ БАЛКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ FEMAP

¹Михалевський Н.А., аспірант,
nazarii.a.mykhalevskiy@lpnu.ua, ORCID: 0009-0007-8107-7892

¹Вегера П.І., к.т.н., доцент,
pavlo.i.vehera@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-3437-1825

¹Бліхарський З.Я., д.т.н., професор,
zinovii.y.blikharskyi@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-4823-6405,

¹Національний університет «Львівська політехніка»
вулиця Карпінського, 6, м. Львів, 79013, Україна

Анотація. У більшості будівель та споруд використовуються залізобетонні елементи, які експлуатуються з різними пошкодженнями та дефектами. У даній статті наведено результати теоретичних досліджень нерівномірно пошкоджених залізобетонних балок за допомогою програмного комплексу FEMAP. Виникнення дефектів та пошкоджень призводять до небезпеки експлуатації будівель і споруд, зміни напружено-деформованого стану, можуть призвести до зменшення жорсткості та несучої здатності конструкції. Дефекти та пошкодження виникають під впливом зовнішнього середовища, механічних впливів, агресивного середовища та внаслідок вибуху.

Дослідження спрямовані на аналіз впливів виникнення нерівномірних пошкоджень залізобетонних балок має велике практичне значення у майбутньому розрахунку залишкової несучої здатності та визначенні напружено-деформованого стану залізобетонного елемента. Тому для проведення теоретичних досліджень використовується моделювання залізобетонних елементів методом скінченних елементів у програмному комплексі FEMAP. Моделювання виконувалось із різними типами пошкоджень, які виникають внаслідок намокання, поперемінного заморожування-розморожування, а також проведено аналіз напруження в бетоні та арматурі, методом скінченних елементів (FEM), який є ефективним чисельним методом для вирішення інженерних задач. На основі результатів моделювання проведено порівняння напружень із граничними напруженнями, визначено деформативність нерівномірно пошкоджених залізобетонних балок. Результати теоретичних досліджень можуть використовуватись в подальшому для практичних дослідів та мають практичне значення при виборі оптимального методу розрахунку залишкової несучої здатності залізобетонного елемента. Важливість цього дослідження полягає в його потенційній здатності покращити безпеку будівельних конструкцій та зменшити ризик виникнення небезпеки під час експлуатації споруд. Дієвість методу FEM у поєднанні з даними результатами відкриває нові можливості для інженерів та дослідників і може служити основою для покращення методів розрахунку залізобетонних елементів при дії навантаження із використанням новітніх технологій моделювання методом скінченних елементів.

Ключові слова: пошкодження, залізобетонні балки, FEMAP, деформативність.

Стаття надійшла до редакції 11.09.2023

EXPERIMENTAL STUDIES OF A DAMAGED BEAM REINFORCED WITH FIBER CONCRETE

¹**Neutov S.P.**, Ph.D., Associate Professor,
neutov.stepan@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-0132-124X
¹**Yesvandzhyia V.Yu.**, postgraduate,
vakhtanhyes22@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1151-3560
¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
Didrikhsona str., 4, Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. The paper presents the results of a study of the load-bearing capacity of a beam damaged during hostilities, which was reinforced with steel fiber concrete. A beam with 20% damage in the compressed zone is considered. Before concreting, a foam liner was installed in the area of the planned damage, the shape and dimensions of which corresponded to the planned damage. After the concrete gained 70% of the brand strength, the liner was removed, and the resulting cavity was filled with a 2% mixture of fiber-reinforced concrete. This is one of the options for strengthening a beam in a comprehensive testing program for damaged beams, which involves studying a series of beams with different types of damage, damage zone (tension and compression) and its size, geometry and method of strengthening. The authors have developed a special stand for testing. Plane transverse bending of the loading of the beam under test is created using a hydraulic jack and a metal I-beam with a traverse that transmits two equal concentrated forces to the beam. The created load is controlled by an exemplary dynamometer of the Tokar system and a ring dynamometer, which acts as a support. Experimental studies have shown that a beam, the cross-section of which is 20% damaged in the middle compressed zone, and the shape of the damage is close to rectangular, has a load-bearing capacity of 93.6 kN, which is 95.0% of the load-bearing capacity of an undamaged beam (98.5 kN). Crack formation began on the 5th stage of loading, when the load value was 32.5 kN, that is, 34.7% of the load-bearing capacity of the damaged beam. In this case, 4 cracks formed in the pure bending zone. At the sixth stage, three more cracks appeared. At stages 9, 10 and 14 of loading, 7 more cracks formed. The maximum final crack opening width was 0.8 mm. throughout the testing process, the fiber-reinforced concrete liner worked with the beam as a single unit. It can be argued that strengthening a beam with 20% damage in the compressed zone using the method considered in the work makes it possible to achieve its load-bearing capacity, which is 95% of the load-bearing capacity of an undamaged beam.

Keywords: damaged beam, steel fiber concrete, experiment, test stand, load-bearing capacity, crack.

Introduction. The construction industry is characterized by the widespread use of reinforced concrete structures, which are one of the main load-bearing elements of buildings and structures. Most of these elements operate under bending conditions. For various reasons, these structures can be damaged, this can be either mechanical damage associated with the destruction of concrete and corrosion of reinforcement as a result of long-term operation, or damage as a result of military operations. Unfortunately, the latter problem becomes especially relevant in our time, when hostilities are taking place in many countries of the world. And if we add to this damage from various natural disasters, then naturally the problem arouses great interest. It is not always advisable to change the design; in most cases it is more economical to strengthen the damaged part without completely replacing it. An effective method of strengthening reinforced concrete elements is the use of high-strength materials such as steel fiber concrete.

Analysis of research and publications. In article [1], the use of a fiber-reinforced concrete shell is proposed to strengthen reinforced concrete beams. Full-scale tests were carried out on beams 4.55 m

long. A 40 mm thick fiber-reinforced concrete shell was applied directly to the surface of the beam. Both strengthening and repair of reinforced concrete beams have been studied. In particular, in the latter case, the beam was initially damaged and then repaired. Numerical analysis is also carried out. Experimental and numerical results show the effectiveness of the proposed technology.

Article [2] discusses the use of steel-polymer (SRP) composites for repairing and strengthening damaged concrete structures. The test program involved the examination of six full-scale reinforced concrete beams that were damaged in the middle region and reinforced using SRP sheets. The number of layers and the number and distribution of U-winding strips were varied. Test results showed that repairing beams with SRP layers and U-strips restored their load-bearing capacity to a level similar to a reinforced concrete beam without damage.

Work [3] is devoted to determining the ability of reinforced concrete beams with steel fiber to absorb energy under explosive loads. The compressive strength of concrete with and without steel fibers was measured, and the load-bearing capacity of reinforced concrete beams was determined using a two-point compression test. The damage levels under blast load applied to reinforced concrete beams were observed and the results showed that reinforced concrete beams manufactured with the addition of steel fibers were less damaged than conventional reinforced concrete beams.

Article [4] describes the strengthening of damaged beams using a fiber reinforced polymer (fiberglass) composite. The problems of ensuring the stability of reinforced beams to bending, shear, torsion, fatigue, impact and blast loading are considered.

Generally speaking, strengthening of damaged beams is carried out in both compression and tension zones. In this case, two main methods are used: installing unloading elements and (or) increasing the cross-section of the structure.

Strengthening beams in the tension zone is presented in numerous publications, of which we note the works [5-8]. No less research is devoted to strengthening beams in a compressed zone – works [9-12], etc.

Significant research is related to the use of new highly efficient building materials, such as high-strength concrete, steel fiber concrete, polymer concrete, basalt concrete [13, 14]. Composite reinforcement based on aramid (AFRP), glass (GFRP) and carbon (CFRP) fibers is widely used. Such materials have a number of advantages: high static and fatigue strength, elastic modulus close to metal, low dead weight, high corrosion resistance, etc. [15-19].

The use of fiber-reinforced concrete to strengthen beams is considered in [10, 11, 20-27].

The purpose of this work was to study the load-bearing capacity of a beam damaged during combat operations, which was reinforced with steel fiber concrete.

Materials and methods of research. All studies were carried out in the laboratories of the departments of structural mechanics and strength of materials of the Odessa State Academy of Construction and Architecture. To make samples of the material, when mixing the concrete mass, fiber was evenly added, the total volume of which was 2% of the volume of the product itself. Previous studies had determined the optimal fiber volume to be 1%, but this was doubled to strengthen the damaged structure. The tests were carried out on prisms and cubes with dimensions of 100×100×400 mm and 100×100×100 mm, respectively, aged for 28 days. Prisms and cubes are made in accordance with regulatory documents [28]. 2 groups of prisms and cubes were made. One is made of ordinary concrete (with coarse aggregate sizes up to 10 mm) class C20/25 and the second is with anchored steel fiber. Each group consisted of six samples. To study the beams, experimental methods of mechanics and the strain gauge method were used.

Results and discussion. To conduct experimental studies, a special stand was developed, consisting of a rigid metal frame with a composite cross-section and two metal strands $\varnothing 16$ mm (Fig. 1). The upper part of the rods ends with a thread, with the help of which a traverse is fixed, which serves as a stop for the model dynamometer. The traverse is fixed using nuts. Plane transverse bending of the loading of the beam under test is created using a hydraulic jack and a metal I-beam with a traverse that transmits two equal concentrated forces to the beam. The created load is controlled by an exemplary dynamometer of the Tokar system and a ring dynamometer, which acts as a support. During the tests, the load transmitted to the beam, deflections and deformations of individual concrete fibers were recorded.



Fig. 1. Test bench

The load was applied in steps of 0.05 from the destructive load, the magnitude of which was determined during preliminary loading. The load at which there was a sharp increase in the rate of deformation of individual concrete fibers was taken as the destructive load.

Each loading step was followed by a holding time of 8-10 minutes. Between loading stages, the process of the onset and development of crack formation was monitored. Deflections were measured using a Maximov deflection meter, and deformations were measured using dial indicators with a division value of 0.01 mm. The indicators were located in the characteristic zones of the beam operation. The first four indicators are located in the middle part of the beam where pure bending occurs. Another 6 indicators are in load transfer zones. The base for measuring deformations of all indicators is 24 cm.

The test program provides for the study of a series of beams with different types of damage. The damage zone (stretched and compressed), the geometry of the damage zone, and the method of reinforcement varied. This paper describes the results of strengthening a beam whose cross-section is 20% damaged in the middle compression zone, and the shape of the damage is shown in Fig. 2 (all measurements are in cm).

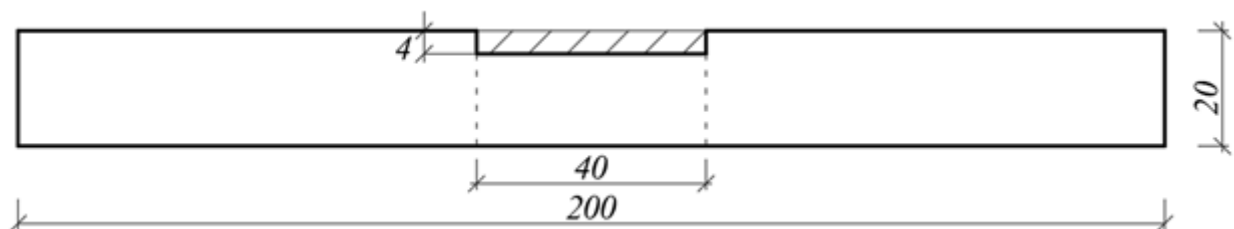


Fig. 2. Nature of beam damage

The studies were carried out on rectangular beams with dimensions of 200×120 mm, reinforced with two vertical frames (Fig. 3). Lower longitudinal reinforcement – $\varnothing 12$ mm, upper – $\varnothing 8$ mm. For transverse reinforcement, $\varnothing 6$ mm rods with a pitch of 87.5 mm were used. In the shear span area, transverse reinforcement is made with $\varnothing 4$ mm bars (A400 class fittings). Shear span length $2h_0$. Working section height 170mm.

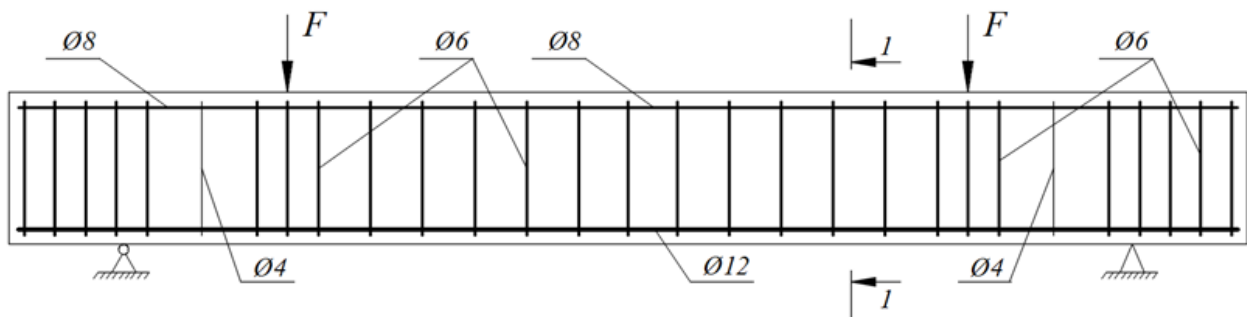


Fig. 3. Beam reinforcement

Before concreting, a foam liner was installed in the area of planned damage, the shape and dimensions of which corresponded to the damage. After the concrete gained 70% of the strength, the liner was removed, and the resulting cavity was filled with a 2% mixture of fiber-reinforced concrete.

The load-bearing capacity of the damaged beam was 93.6 kN, which is 95.0% of the load-bearing capacity of the undamaged beam (98.5 kN). Crack formation began at the 5th stage of loading, when the load value was 32.5 kN, that is, 34.7% of the load-bearing capacity of the damaged beam. In this case, 4 cracks formed in the pure bending zone. The formation of cracks (Fig. 4) and the width of their opening at all stages of loading are given in Table 1.

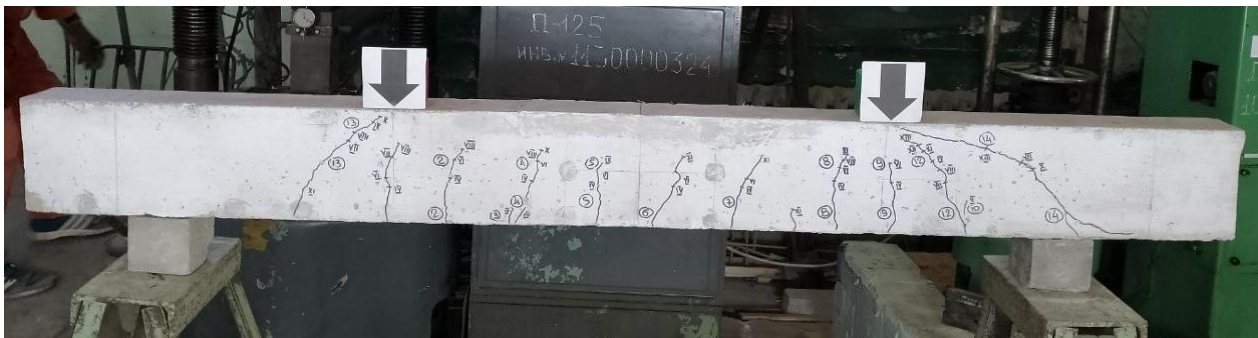


Fig. 4. Formation of cracks in a damaged beam

Table 1 – Cracks in a damaged beam

Stage loads	Magnitude load, kN	Number cracks	Final width opening, mm
1	6.5		
2	13.0		
3	19.5		
4	26.0		
5	32.5		1, 3 – 0.3; 2 – 0.1; 4 – 0.2
6	39.0	5-7	5 – 0.2; 6, 7 – 0.1
7	45.5		
8	52.0		
9	58.5	8-11	8, 9, 11 – 0.1; 10 – 0.05
10	65.0	12-13	12 – 0.7; 13 – 0.8
11	71.5		
12	78.0	14	0.7
13	84.5		
14	91.0		
15	93.6		

It should be noted that until its destruction, the steel-fiber-concrete liner worked with the beam as a single whole.

Conclusions. Thus, experimental studies have shown that a beam, the cross-section of which is 20% damaged in the middle compressed zone, and the shape of the damage is close to rectangular, has a load-bearing capacity of 93.6 kN, which is 95.0% of the load-bearing capacity of an undamaged beam (98.5kN). Crack formation began on the 5th stage of loading, when the load value was 32.5 kN, that is, 34.7% of the load-bearing capacity of the damaged beam. In this case, 4 cracks formed in the pure bending zone. At the sixth stage, three more cracks appeared. At stages 9, 10 and 14 of loading, 7 more cracks formed. The maximum final crack opening width was 0.8 mm. throughout the testing process, the fiber-reinforced concrete liner worked with the beam as a single unit. It can be argued that strengthening a beam with 20% damage in the compressed zone using the method considered in the work makes it possible to achieve its load-bearing capacity, which is 95% of the load-bearing capacity of an undamaged beam.

References

- [1] Moskva Martinola, Giovanni & Meda, Alberto & Plizzari, Giovanni & Rinaldi, Zila, "Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete", *Cement & Concrete Composites*, 32, pp. 731-739, 2010. 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.001.1962.
- [2] Hayder Alghazali, John Joseph Myers, "Behavior of Full-Scale Damaged Beams Repaired Using a Steel Reinforced Polymer (SRP) Technique", *Special Publication*, vol. 331, pp. 122-135, 2019. DOI: 10.14359/51715597.
- [3] Fatih Altun, Mehmet M. Köse, Canan Yilmaz, Kamuran Arı, "Experimental investigation of reinforced concrete beams with and without steel fiber under explosive loading", *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 14(6), pp. 419-426, 2008.
- [4] A. Siddika, M.A. Al Mamun, R. Alyousef, & Y.H.M. Amran, "Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review", *Journal of Building Engineering*, 100798, 2019. doi:10.1016/j.job.2019.1007985.
- [5] V.G. Kvasha, I.V. Melnyk, M.D. Klympush, "Rekonstruktsiia zalizobetonnoho avtodorozhnoho mosta z pidsylenniam balok prykleienymy vuhleplastykamy", *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy*, vol. 10, pp. 267-275, 2003.
- [6] O.P. Borysiuk, O.P. Kononchuk, *Napruzheno-deformovanyi stan normalnykh pereriziv zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv, pidsylenykh vuhleplastykamy za dii malotsyklovoho navantazhennia : monohrafiia*. Rivne: NUVHP, 2014.
- [7] O.M. Perlova, "Nesucha zdatnist, zhorstkist ta deformatyvnist zalizobetonnykh elementiv iz zmishanym armuvanniam", dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.01, Derzhavnyi NDI budivelnnykh konstruktsii. Kyiv, 2008.
- [8] I.V. Melnyk, R.Z. Dobryanskyi, R.I. Kanafotskyi, O.O. Kuzyk, M.V. Filipishyn, "Vyprovuvannia zalizobetonnykh balok z pozdovzhnoiu armaturoiu klasu A-II, pidsylenykh kompozytnymy materialamy Ruredil X Mesh Gold", *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy*, vyp. 20, pp. 487-492, 2010.
- [9] I.V. Zadorozhnikova, "Eksperymentalni doslidzhennia trishchynostiikosti ta prohyniv balok pidsylenykh u stysnutii zoni", *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy*, vyp. 15, pp. 364-369, 2007.
- [10] O.I. Valovoy, O.Yu. Eremen, "Porivniannia efektyvnosti variantiv pidsylennia zalizobetonnykh elementiv shcho pratsiuiut na zghyn", *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy*, vyp. 14, pp. 352-359, 2007.
- [11] S.D. Semenyuk, Yu.G. Boloshenko, "Экспериментальные исследования работы усилённых железобетонных балок при малосыкловом нагружении", *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy*, vyp. 22, pp. 841-850, 2011.

- [12] D.V. Popruga, O.I. Valovoy, "Napruzhenno-deformovanyi stan pidsylenykh zalizobetonnykh zghynalnykh elementiv vyhotovlenykh na vidkhodakh hirnycho-zbahachuvalnykh kombinativ", *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy*, vyp. 21, pp. 611-617, 2011.
- [13] H.W. Chung, "Epoxy-Repaired Concrete Beams", *ACI Journal*, vol. 72, no. 5, pp. 233-234, 1975.
- [14] S. Kajfasz, "Concrete beams with reinforcement bonded by gluing", *International RILEM Conference*, Paris, 1967.
- [15] ACI 440.2R-02.2008. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, Published by American Concrete Institute, Farmington Hills, July 2008.
- [16] CNR-DT 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures - Materials, RC and PC structures, masonry structures, CNR, Italian National Reserch Council, Rome, Italy, 2004.
- [17] Deutsches Institut fur Bautechnik Z-36.12-80, 2010: General Construction Authorisation for Sika® CarboDur® (Germany).
- [18] Instytut badawczy drog i mostow, technical approval No. AT/2003-04- 0336, System materialow Sika CarboDur do wzmacniania konstrukcji obiektow mostowych (Polish).
- [19] SIA 166. Klebebewehrungen, 2003 /2004 (CH) (Switzerland).
- [20] A.Ya. Barashikov, O.P. Sunak, B.A Boyarchuk, "Eksperymentalni doslidzhennia zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv pidsylenykh riznymy sposobamy", *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy*, vyp. 5, pp. 212-219, 2000.
- [21] A.Ya. Barashikov, V.M. Kolyakova, M. Blaly, "Prohyby zhelezobetonnykh balok posle usyleniia rastianutoi zony razlychnymy materyalamy", *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy*, vyp. 13, pp. 340-345, 2005.
- [22] Mohammed Elghazy, Ahmed El Refai, Usama A Ebead, Antonio Nanni, "Fatigue and Monotonic Behaviors of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRCM Composites", *Journal of Composites for Construction*, 22(5), 2018. DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000875.
- [23] Karzad, Abdul, "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer", 2020. DOI:10.13140/RG.2.2.15656.52484.
- [24] Ning Zhuang, Honghan Dong, Da Chen, Yeming Ma, "Experimental Study of Aged and Seriously Damaged RC Beams Strengthened Using CFRP Composites", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(6), 1-9, 2018. DOI:10.1155/2018/6260724.
- [25] Md Ashraful Alam, Ali Sami Abdul Jabbar, Zamin Jumaat, Kamal Nasharuddin Mustapha, "Effective Method of Repairing RC Beam Using Externally Bonded Steel Plate", *Applied Mechanics and Materials*, 567, pp. 399-404, 2014. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.567.399.
- [26] Ali Jahami, Yehya Temsah, Jamal Khatib, "The efficiency of using CFRP as a strengthening technique for reinforced concrete beams subjected to blast loading", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, pp. 411-420, 2019.
- [27] W.A. Obaid, A.K. Al-asadi, H. Shaia, "Repair andstrengthening ofconcrete beam materials using different CFRPlaminates configuration", *MaterialsToday: Proceedings.*, 49, 2806-10, 2022.
- [28] DSTU B V.2.7-214:2009. Betony. Metody vyznachennia mitsnosti za kontrolnymy zrazkamy. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2010.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕНОЇ БАЛКИ, ПОСИЛЕННОЇ ФІБРОБЕТОНОМ

¹Неутов С.П., к.т.н., доцент,
neutov.stepan@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-0132-124X

¹Єсванджия В.Ю., аспірант,
vakhtanhyes22@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1151-3560
¹Одеська державна академія будівництва та архітектури
Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. У роботі наведено результати дослідження несучої здатності пошкодженої під час бойових дій балки, яка була армована сталевібробетоном. Розглядається балка з 20% пошкодженням у стиснутій зоні. Перед бетонуванням в зоні планового пошкодження встановлювався пінопластовий вкладиш, форма і розміри якого відповідали плановому пошкодженню. Після набору бетоном 70% марочної міцності вкладиш видаляли, а утворену порожнину заповнювали 2% сумішшю фібробетону. Це один із варіантів зміцнення балки в комплексній програмі випробувань пошкоджених балок, яка передбачає дослідження серії балок з різними видами пошкоджень, зони пошкодження (розтягнення і стиснення) та її розмірів, геометрії та способу зміцнення. Для тестування автори розробили спеціальний стенд. Плоско-поперечний вигин навантаження досліджуваної балки створюється за допомогою гідравлічного домкрата і металевої двотаврової балки з траверсою, яка передає на балку дві рівновеликі зосереджені сили. Створене навантаження контролюється зразковим динамометром системи Токаря і кільцевим динамометром, який виконує роль опори. Експериментальними дослідженнями встановлено, що балка, поперечний переріз якої у середній стиснутій зоні пошкоджений на 20 %, а форма пошкодження наближена до прямокутної, має несучу здатність 93,6 кН, що становить 95,0 % від несучої здатності непошкодженої балки (98,5 кН). Тріщиноутворення почалося на 5 ступені навантаження, коли значення навантаження становило 32,5 кН, тобто 34,7 % несучої здатності пошкодженої балки. При цьому в зоні чистого вигину утворилося 4 тріщини. На шостому етапі з'явилися ще три тріщини. На 9, 10 і 14 етапах навантаження утворилося ще 7 тріщин. Максимальна кінцева ширина розкриття тріщини становила 0,8 мм. Протягом усього процесу випробувань фібробетонний вкладиш працював з балкою, як єдине ціле. Можна стверджувати, що підсилення балки з 20% пошкодженням у стиснутій зоні розглянутим у роботі методом дозволяє досягти її несучої здатності, яка становить 95% від несучої здатності непошкодженої балки.

Ключові слова: пошкоджена балка, сталевібробетон, експеримент, стенд, несуча здатність, тріщина.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2023

ANALYSIS OF DYNAMICS AND OPTIMISATION OF TRANSIENT MOTION MODES OF HOISTING MECHANISMS OF OVERHEAD URBAN CRANES

¹**Chovnyuk Yuriy**, Ph.D., Associate Professor,
ychovnyuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0608-0203

¹**Cherednichenko Petro**, Associate Professor,
petro_che@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7161-661X

¹**Shudra Nataliia**, Senior Lecturer,
Shudra_n@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5416-7680,

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

²**Kozupitsa Sergey**, Associate Professor,
sirko58@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3038-4431,

²*National Aviation University, Kiev,*
Lubomyr Huzar prospect, 1, Kyiv, 03058, Ukraine

Abstract. The research of operating modes of hoisting mechanisms and machines, in particular, overhead and city-building cranes is carried out. Based on dynamic analysis of operating modes of mechanisms of the mentioned machines the character of load occurrence in their elastic elements (ropes) is established. The synthesis of optimum transient modes of operation (start/braking) of city-building and overhead cranes is carried out. The models of L.D. Landau and N.A. Lobov for physical and mechanical analysis of motion of the specified machines are used, on the basis of which with attraction of methods of classical calculus of variations the laws of motion of a cargo and a cargo carriage of similar cranes which optimize (minimize) inevitably arising pendulum oscillations of a cargo on a rope (as in the period of start-up of the crane, and at its braking, up to full stop) are received analytically.

The evaluation of motion modes in the work is carried out by using a criterion with sub-integral functions in the form of "energy" of accelerations of higher orders (third, fourth, etc.). Exactly such criteria are used in the selection of modes of motion of lifting mechanisms of cranes of bridge/bridge-building type, which have in their composition elastic elements (ropes). The above approach makes it possible to achieve continuity of functions of velocities and accelerations of various links of the system, which leads to a significant reduction in their oscillations. The analysis of modes of motion of the system, which is described by the main coordinate of motion and elastic coordinates, allowed one to establish the regularity of using the proposed criterion to minimize the elastic vibrations of individual links (ropes) of the crane hoisting mechanism.

The results of this study can be further used to clarify and improve existing engineering methods for calculating loads in flexible/elastic elements (ropes) of bridge and city-building cranes both in the design of hoisting mechanisms and in the modes of their real operation when mechatronic control systems are used in controlling the movement of the load carriage.

Key words: analysis, dynamics, optimization, transient motion modes, starting, braking, hoisting mechanisms, overhead and urban cranes.

Introduction. The nature of movement of the main links of lifting and transporting mechanisms and machines significantly affects the quality of the performance of technological processes by such machines and mechanisms, their productivity, reliability, durability, etc. Thus, the law of change determines the mode of movement of this or that link of the mechanism or machine in time or position of kinematic characteristics (displacements, speeds, etc.) and time of movement. For a certain design of a hoisting crane mechanism, the law of motion of an individual link (for example, the drive of a city building or bridge crane) determines the law of motion of other

links. The complete time of motion of a hoisting mechanism is the time interval from the beginning of motion to its end. It is the complete cycle of motion of a hoisting crane, conveying machine or mechanism can be divided into three main stages: 1) stage of start (run-up, acceleration); 2) stage of steady motion (with constant speed); 3) stage of stop (run-out). Each of the above stages is characterized by the duration in time and the laws of motion of the links. In this study, we will assume that the durations of the stages considered are set, and it is necessary to determine on them such modes of motion that minimize certain criteria of quality of motion or the hoisting/transporting mechanism or machine itself.

In particular, the start-up stage of a hoisting mechanism, transporting machine is characterized by the growth of the speed of a link, for example, a drive, from zero value to a certain value. In this case, various modes of motion minimizing inertial loads, the power of the drive itself, loads of oscillatory nature (on elastic elements - ropes of hoisting mechanisms of cranes, for example, of the city-building or bridge types) or a complex of such characteristics can be used. In addition, at the stage of start-up can be found modes of motion, which at given restrictions on the above characteristics provide, in particular, and the minimum duration of start-up.

This study is devoted to the solution of the problems outlined above.

Analysis of publications on the topic of research. The authors [1-21] have investigated in sufficient detail the main features of the dynamics of the functioning of overhead/bridge cranes and have given scientifically justified conditions and laws of motion of the hoisting carriage and the load on the crane rope, under which the arising pendulum vibrations of the load can be minimized, however, the results obtained in the cited works do not always have a justified physical meaning and can be implemented in the real operation of hoisting mechanisms, since they are based on incorrect initial and final (terminal) conditions. In particular, usually the works cited above consider only kinematic conditions of motion, both at the beginning and at the end of the transient period (say, the start-up mode). There is a problem with this approach, since the terminal conditions (at the beginning of the motion) lack the cause that led to the motion - the force factor. Also, after the end of the start-up period, when the crane system enters the steady state (and begins to move at a constant speed), based on physical considerations, Newton's first law must be fulfilled, and the force factor is absent, or the equidistance of all forces is zero. Among the published and cited above works, the authors of this study have nowhere (not once!) met the confirmation of these relevant reasoning. It should also be noted that when considering the forces of resistance to movement, which are reduced in the start-up period of the crane system, as a rule. to the forces of dry friction, the horizontal component of these forces is considered only in one phase, when only the movement from the place begins (ie, the crane trolley ahead of the movement of the load on the rope), but the start-up period can last for a period of time when the sign of this force is reversed (the load on the rope pulls the trolley). Therefore, the generalized dry friction force can lead to chaotic oscillations of the system (dynamic, deterministic chaos). This is confirmed by numerical analysis of the problem on a PC computer. Consequently, when correctly formulating the problem, it is necessary to clearly limit exactly what time interval is described by the proposed model equations of motion. It is these above-mentioned circumstances that force the authors of this study to correct the results previously obtained in the above-quoted works, to adjust them to satisfy the generally recognized laws of classical mechanics.

Goal and task lie in the substantiation of the physical and mechanical model and laws of motion of the cargo trolley and the cargo on the rope of overhead and city-building cranes, at which the pendulum oscillations of the cargo in the transient modes of operation of these cranes can be minimized. At the same time, two basic models of motion of mechanical system (model of Lobov N.A. [3] and model of Landau L.D. [1]) are used to achieve the purpose of the research. The author's model [3] is linear, and the model of work [2] is linearized in this study.

Research data and methodology. The methods of mathematical modelling, classical calculus of variations and mathematical physics are used in this work. In addition, the results of works of domestic and foreign scientists on the methodology of research, analysis and synthesis of optimal transient motion modes (starting, braking, reversing) of hoisting mechanisms of

urban/bridge cranes have been used.

Research outcomes.

1. Calculation of optimal modes of motion of the hoisting mechanism of the bridge/bridge crane in the framework of the model of Lobov N.A. [3].

1.1. *The starting mode of the hoisting mechanism in which pendulum oscillations are minimised.* As an analogue scheme of pendulum oscillations of the load, we use the dynamic system of work [3], shown in Fig. 1. The designations of the above model are retained in this study.

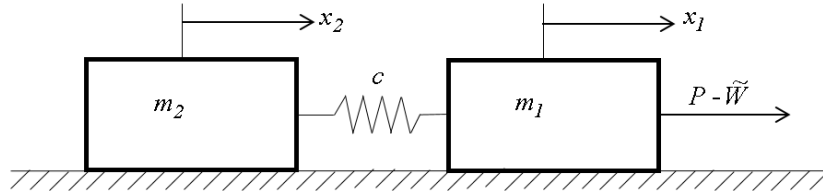


Fig. 1. Analogue circuit of pendulum oscillations of the crane load [2, 7]

In Fig. 1, the following notations are introduced: m_1 – the mass of the crane or load trolley given to the translational motion of the crane or trolley; m_2 – mass of the load; $c = m_2 \cdot g$ – weight of the load; g – free fall acceleration ($g = 9,81 \text{ M} / \text{c}^2$); P – total traction or braking force of the crane or trolley drive wheels; \tilde{W} – the force of resistance to the movement of the crane or trolley (non-linear) and is described by the Coulomb-Amontons law (dry friction), $\tilde{W} = W \cdot \text{sign}(\dot{x}_1)$, W – amplitude of dry sliding friction force; x_1 and x_2 – horizontal displacement of masses m_1 and m_2 ; S – total cable tension; φ – angle of deflection of the ropes from the vertical; T – horizontal component of forces in ropes; H – the length of the cables' tangs; c – cable rigidity (horizontal) ($c = m_2 g / H$).

Since the maximum deviations of the cables from the vertical do not exceed $(10...12)^\circ$, let us assume that $\sin\varphi \approx \varphi$, $\cos\varphi \approx 1,0$. Having made that assumption [2]:

$$x_2 = x_1 + H \cdot \varphi, \quad s = G = m_2 g, \quad \text{and the horizontal component of rope tension has the form of:}$$

$$T = s \cdot \varphi = m_2 g \cdot (x_2 - x_1) / H. \tag{1}$$

Equation of motion of a crane or trolley (mass m_1) assumes the following form:

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1 + \frac{m_2 g}{H} \cdot (x_1 - x_2) = P - \tilde{W} = P - W \cdot \text{sign}(\dot{x}_1), \tag{2}$$

a equation of motion of the load in the horizontal direction (for mass m_2):

$$m_2 \cdot \ddot{x}_2 + \frac{m_2 g}{H} \cdot (x_2 - x_1) = 0. \tag{3}$$

In the scheme shown in Fig. 1, within the framework of the given dynamic model of the system, the mass m_2 slides along the supporting surface without friction [2, 7]. The movement of such a mechanical system is described by the following equations:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + c \cdot (x_1 - x_2) = P - W \cdot \text{sign}(\dot{x}_1); \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 + c \cdot (x_2 - x_1) = 0. \end{cases} \tag{4}$$

Comparing (4) with (2) and (3), we see that both systems of equations are identical if we assume $c = m_2 \cdot g / H$. It follows that the dynamic effect of an oscillating load on a crane (or trolley) is similar to that of a load attached by springs with stiffness of (c) , that equals G / H [2, 7]. It is this analogy that allows us to visualize the effect of a swinging load on the motion of the crane. When $x_1 > x_2$, the deflected load increases the resistance forces to the crane's movement.

Coefficient $c = G/H$ can be called an analogue of the transverse rigidity coefficient of cables. Indeed, when $x_1 > x_2$:

$$m_1 \cdot \dot{x}_1 = P - W \cdot \text{sign}(\dot{x}_1) - c \cdot (x_1 - x_2) = P - \{W \cdot \text{sign}(\dot{x}_1) + c \cdot (x_1 - x_2)\}, \quad (5)$$

and the total drag force (friction + the effect of the load on the rope) will be:

$$F_{onopy} = W \cdot \text{sign}(\dot{x}_1) + c \cdot (x_1 - x_2), \quad (6)$$

with $\dot{x}_1 > 0$ from (6) it is obvious that in the case of $x_1 > x_2$ drag force increases.

When $x_2 > x_1$ in (6), as long as $\dot{x}_1 > 0$ it is obvious, that the total drag force decreases.

During the period of crane acceleration we consider that $\dot{x}_1 > 0$, then instead of system (4) we have:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 + c \cdot (x_1 - x_2) = P - W; \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 + c \cdot (x_2 - x_1) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

By simple transformations and by introducing substitution of variables on $\xi = (x_1 - x_2)$ the system (7) can be reduced to:

$$\ddot{\xi} + \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \cdot \frac{g}{H} \cdot \xi = \frac{P - W}{m_1}, \quad (8)$$

else:

$$\ddot{\xi} + \Omega^2 \cdot \xi = \frac{P - W}{m_1}, \quad \Omega^2 = \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \cdot \frac{g}{H}. \quad (9)$$

As initial conditions for equation (9) we choose the following:

$$x_1|_{t=0} = x_2|_{t=0} = 0 \Leftrightarrow \xi|_{t=0} = 0; \quad \dot{x}_1|_{t=0} = \dot{x}_2|_{t=0} = 0 \Leftrightarrow \dot{\xi}|_{t=0} = 0. \quad (10)$$

Then the solution of equation (9) under initial conditions (10) has the form:

$$\xi(t) = \left(\frac{P - W}{m_1}\right) \cdot \frac{1}{\Omega^2} \cdot (1 - \cos \Omega t) = \left(\frac{P - W}{m_1}\right) \cdot \frac{2}{\Omega^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\Omega t}{2}\right). \quad (11)$$

The modulus of the tension force of the rope with the load (in the horizontal direction) acquires a value:

$$\begin{aligned} |T| &= c \cdot |x_1 - x_2| = c \cdot \left(\frac{P - W}{m_1}\right) \cdot \frac{2}{\Omega^2} \cdot \sin^2\left(\frac{\Omega t}{2}\right) = \frac{m_2 \cdot g}{H} \cdot \left(\frac{P - W}{m_1}\right) \cdot \frac{2}{\left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right) \cdot \frac{g}{H}} \cdot \sin^2\left(\frac{\Omega t}{2}\right) = \\ &= 2 \cdot \frac{m_2}{m_1} \cdot (P - W) \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)} \cdot \sin^2\left(\frac{\Omega t}{2}\right) = 2 \cdot \frac{m_2}{(m_1 + m_2)} \cdot (P - W) \cdot \sin^2\left(\frac{\Omega t}{2}\right). \end{aligned} \quad (12)$$

At the time t_n^* , the following can be deduced:

$$\frac{\Omega \cdot t_n^*}{2} = \frac{\pi}{2} \cdot (2n - 1), \quad n \in \mathbb{N}, \quad (13)$$

significant overloading (force, dynamic) of the crane rope system occurs because:

$$|T|_{t=t_n^*} = 2 \cdot \frac{m_2}{(m_1 + m_2)} \cdot (P - W). \quad (14)$$

Such situations in the operation of hoisting mechanisms of overhead travelling cranes and urban construction cranes are undesirable, as such overloads of ropes may lead to rope breaks and consequently to accidents. Therefore, it is desirable to avoid such states of the hoisting system/mechanisms of the above cranes.

Let's determine the mode of motion of the crane hoisting mechanism (trolley and load), at which the force and dynamic loads on the rope will be minimal during the start-up period of the crane system. Duration of the start-up period of the hoisting mechanism is denoted by τ_s . The criterion of the quality of movement, at which the start of the crane load lifting mechanism creates minimum loads on its (crane) rope system, takes the following form:

$$I = \left\{ \frac{1}{\tau_s} \cdot \int_0^{\tau_s} (c \cdot \xi)^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \min. \quad (15)$$

Using equation (9), the criterion (15) can be represented in the following form:

$$I = \left\{ \frac{1}{\tau_s} \cdot \int_0^{\tau_s} \left[c \cdot \left(\frac{P-W}{m_1} - \ddot{\xi} \right) \cdot \frac{1}{\Omega^2} \right]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \min. \quad (16)$$

The necessary condition for realization/achievement of criteria (15), (16) is the Euler-Poisson equation [9, 12, 13], which in this case (for constant, independent of time t , values P and W assumes the form:

$$\xi^{(IV)} = 0. \quad (17)$$

We will look for the solution of equation (17) in the form of t a third-order spline:

$$\xi(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3, \quad (18)$$

where constants a_0, a_1, a_2, a_3 are found from the following terminal conditions:

$$\xi|_{t=0} = 0; \quad \dot{\xi}|_{t=0} = 0; \quad \ddot{\xi}|_{t=0} = \frac{P-W}{m_1}; \quad \dot{\xi}|_{t=\tau_s} = 0. \quad (19)$$

Applying the coefficients a_0, a_1, a_2, a_3 obtaining:

$$a_0 = 0; \quad a_1 = 0; \quad a_2 = \frac{(P-W)}{2 \cdot m_1}; \quad a_3 = -\frac{(P-W)}{3 \cdot \tau_s \cdot m_1}. \quad (20)$$

Thus for $\xi(t)$, that satisfies motion quality criteria (15), (16), one would obtain:

$$\xi(t) = \frac{(P-W)}{2 \cdot m_1} \cdot t^2 - \frac{(P-W)}{3 \cdot \tau_s \cdot m_1} \cdot t^3 = \frac{(P-W)}{m_1} \cdot \left\{ \frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3 \cdot \tau_s} \right\}, \quad 0 \leq t \leq \tau_s. \quad (21)$$

With $\xi(t)$, (21) for $|T|$ one has:

$$|T| = c \cdot |\ddot{\xi}| = c \cdot \frac{(P-W)}{m_1} \cdot \left\{ \frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3 \cdot \tau_s} \right\}, \quad 0 \leq t \leq \tau_s. \quad (22)$$

The minimal value $|T|$ reaches at the time $t = 0$ (at the start), and it reaches its maximal value $t = \tau_s$:

$$|T|_{\max} = |T|_{t=\tau_s} = c \cdot \frac{(P-W)}{m_1} \cdot \left\{ \frac{\tau_s^2}{2} - \frac{\tau_s^3}{3 \cdot \tau_s} \right\} = c \cdot \frac{(P-W)}{m_1 \cdot 6} \cdot \tau_s^2. \quad (23)$$

Then,

$$|T|_{\max} = |T|_{t=\tau_s} = \frac{m_2 g}{H} \cdot \frac{(P-W)}{6 \cdot m_1} \cdot \tau_s^2. \quad (24)$$

Graph, that reflects the relationship between $|T|$ and t shown on Fig. 2, has smooth (rather than sharp) character of change with time.

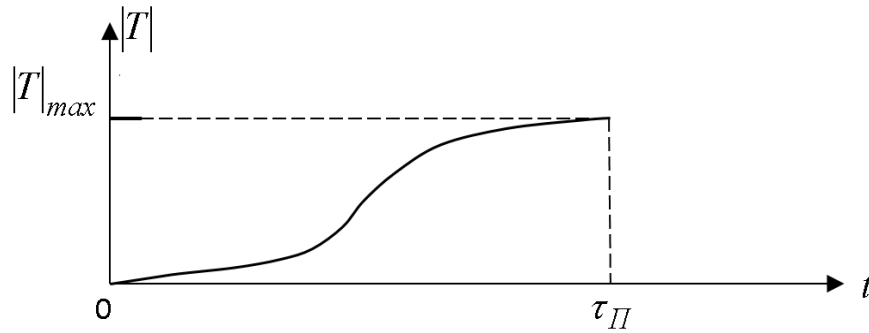


Fig. 2. Dependence $|T|$ on t the optimal starting mode of the crane system

Let's find out what the laws of motion should be with $x_1(t)$ and $x_2(t)$, so that the motion quality criteria (15), (16) under initial conditions are satisfied:

$$x_1|_{t=0} = x_2|_{t=0} = 0; \quad \dot{x}_1|_{t=0} = \dot{x}_2|_{t=0} = 0. \quad (25)$$

In order to find $x_2(t)$ let's apply the condition (25) and the second equation from the system (7), obtaining:

$$\ddot{x}_2 = \frac{c}{m_2} \cdot \xi(t). \quad (26)$$

Integrating twice (26) over t (accounting for (25)), one gets:

$$x_2(t) = \frac{c}{m_1 \cdot m_2} \cdot (P - W) \cdot \left\{ \frac{t^4}{24} - \frac{t^5}{60 \cdot \tau_s} \right\}. \quad (27)$$

Since $\xi(t) = x_1 - x_2$, one has:

$$x_1(t) = x_2(t) + \xi(t), \quad (28)$$

$$x_1(t) = \frac{c}{m_1 \cdot m_2} \cdot (P - W) \cdot \left\{ \frac{t^4}{24} - \frac{t^5}{60 \cdot \tau_s} \right\} + \frac{(P - W)}{m_1} \cdot \left\{ \frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3 \cdot \tau_s} \right\}. \quad (29)$$

therefore it is evident that $x_1(t)$ (29) and $x_2(t)$ (27) apply only to the time period $t \in [0, \tau_s]$.

Using mechatronic control system of the crane trolley drive frequency (m_1), it is possible to establish exactly during the start-up of the crane system on the time interval $t \in [0, \tau_s]$ the laws of motion of the load (27) and the load trolley (29) [7].

Noted, the equation $|T|_{max}$ (24) with $|T|_{max}$ (14) demonstrates:

$$\tau_s < \sqrt{\frac{12H}{g \cdot \left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)}}, \quad (30)$$

in the mode of motion according to laws (27), (29) smaller values of dynamic loads are achieved with the cable system of the crane. For $H = 10\text{m}$, $\frac{m_2}{m_1} \approx 0,5$ the value τ_s for (30) gives $\tau_s < 3\text{s}$.

1.2 The mode of coasting (braking) of hoisting mechanism at which pendulum oscillations are minimized. By analogy with paragraph 1.1. analyze and optimize the mode of motion of the hoisting mechanism of the crane, at which minimize the pendulum oscillations of the load on the rope, which corresponds to the braking of the crane to a complete stop (run-out mode of the speed of rotation of the drive of the load carriage).

Instead of P one enters (8) P_B – braking force (which is a constant value independent of time t). Let us denote the duration of the braking process as τ_B .

To fulfill the traffic quality criterion:

$$I^* = \left\{ \frac{1}{\tau_B} \cdot \int_0^{\tau_B} \left[c \cdot \left(\frac{P_B - W}{m_1} - \ddot{\xi} \right) \cdot \frac{1}{\Omega^2} \right]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \min, \quad (31)$$

a necessary condition for the realization of which is the Euler-Poisson equation (17), we search for the solution of (last) in the form of a spline t of the third order:

$$\xi(t) = \tilde{a}_0 + \tilde{a}_1 \cdot t + \tilde{a}_2 \cdot t^2 + \tilde{a}_3 \cdot t^3, \quad (32)$$

where constants $(\tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \tilde{a}_3)$ are found from the following terminal conditions:

$$\xi|_{t=0} = 0; \quad \dot{\xi}|_{t=0} = 0; \quad \ddot{\xi}|_{t=0} = \frac{P_B - W}{m_1}; \quad \xi|_{t=\tau_B} = 0. \quad (33)$$

Applying (32) for coefficients $\tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \tilde{a}_3$ one has:

$$\tilde{a}_0 = 0; \quad \tilde{a}_1 = 0; \quad \tilde{a}_2 = \frac{(P_B - W)}{2 \cdot m_1}; \quad \tilde{a}_3 = -\frac{(P_B - W)}{3 \cdot \tau_B \cdot m_1}. \quad (34)$$

Therefore, with $\xi(t)$ (32) one gets:

$$\xi(t) = \frac{(P_B - W)}{m_1} \cdot \left\{ \frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3 \cdot \tau_B} \right\}, \quad 0 \leq t \leq \tau_B. \quad (35)$$

Ratios for $|T|_{max}$ braking the crane to a complete stop have a form similar to (23), (24), but with replacement in them $\tau_s \rightarrow \tau_B, P \rightarrow P_B$:

$$|T|_{max} = |T|_{t=\tau_B} = c \cdot \frac{(P_B - W)}{6 \cdot m_1} \cdot \tau_B^2 = \frac{m_2 \cdot g}{H} \cdot \frac{(P_B - W)}{6 \cdot m_1} \cdot \tau_B^2. \quad (36)$$

Relationship between $|T|$ and t in the braking process of the crane mechanism has a form similar to the one shown in Fig. 2 with an obvious substitution $|T|_{max}$ (36) and on the time axis $(t) \tau_s \rightarrow \tau_B$.

Let us further elucidate the laws of motion of masses: $m_2 - x_2(t)$ and $m_1 - x_1(t)$, at which the motion quality criterion (31) under initial conditions is fulfilled:

$$x_1|_{t=0} = x_2|_{t=0} = 0; \quad \dot{x}_1|_{t=0} = \dot{x}_2|_{t=0} = V, \quad (37)$$

where: V – initial speed of uniform motion (without pendulum oscillations) of the load lifting mechanism (load trolley and load on the rope). For $x_2(t)$ one has:

$$x_2(t) = \frac{c}{m_1 \cdot m_2} \cdot (P_B - W) \cdot \left\{ \frac{t^4}{24} - \frac{t^5}{60 \cdot \tau_B} \right\} + V \cdot t, \quad (38)$$

and for $x_1(t)$ it is easy to determine the following law of motion:

$$x_1(t) = \frac{c}{m_1 \cdot m_2} \cdot (P_B - W) \cdot \left\{ \frac{t^4}{24} - \frac{t^5}{60 \cdot \tau_B} \right\} + V \cdot t + \frac{(P_B - W)}{m_1} \cdot \left\{ \frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3 \cdot \tau_B} \right\}, \quad (39)$$

Formulas (38) and (39) take place only in the time interval $t \in [0, \tau_B]$.

The estimation (30) is also valid for the case of braking of the hoisting mechanism:

$$\tau_B < \sqrt{\frac{12 \cdot H}{g \cdot \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right)}}. \quad (40)$$

It should be noted that the control of the motion parameters of the trolley and the load on the rope, as well as the actual values of the τ_s, τ_B belong to a special mechatronic control system [7].

2. Calculation of optimal modes of motion of the lifting mechanism of the bridge/bridge crane based on D.L. Landau's model [1].

2.1 *Start-up mode.* We use the approach of [6] to analyze the dynamics and optimize the modes of motion of the elements of the hoisting mechanism of an overhead/bridge crane. In this case, the model of the problem is presented in Fig. 3 and is reduced to the following.

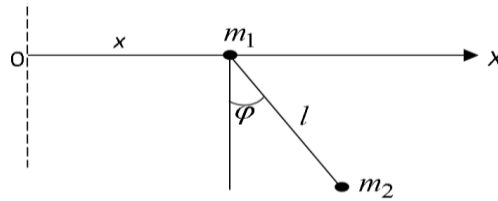


Fig. 3. Geometry of the problem (L.D. Landau model [1])

Flat pendulum with mass m_2 , whose point of fixture (with point mass m_1) can move along a horizontal straight line (Fig. 3).

Entering the coordinate of x point and m_1 (crane load trolley) and angle φ between the pendulum cable (of length l) and the vertical axis. The load has mass m_2 and its coordinate OX :

$$x_2 = x + l \cdot \sin \varphi. \tag{41}$$

For $\varphi \ll 1$ instead of (41) one has:

$$x_2 = x + l \cdot \varphi. \tag{42}$$

This formulation of the problem is fundamentally different from the model of N.A. Lobov considered above, since in the model of L.D. Landau x_2 is a coordinate depending on x ($x \equiv x_1$ since N.A. Lobov's model). In addition, in the L.D. Landau model in the refined formulation one should also consider the motion in the direction perpendicular to the axis OX . (Recall that in the model of N.A. Lobov x_2 – independent from x_1 coordinate, and the motion of the system is considered only in the horizontal direction). Therefore, the results obtained in the L.D. Landau model will differ from those obtained in the N.A. Lobov model. The authors of this study, believe that the L.D. Landau model, refined in this study and supplemented by taking into account the forces acting on mass m_1 is more accurate.

The Lagrange function for this problem has the form:

$$L = \frac{(m_1 + m_2)}{2} \cdot \dot{x}^2 + \frac{m_2}{2} \cdot l^2 \cdot \dot{\varphi}^2 + m_2 \cdot l \cdot \dot{x} \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi + m_2 g l \cdot \cos \varphi + x \cdot F(t), \tag{43}$$

where: $F(t)$ describes the reciprocal of all forces (driving/braking, frictional forces) acting on the mass m_1 in the horizontal direction (along the axis OX) and create its motion along the specified axis. Further, to analyze the transient modes of crane operation (starting, braking), we consider the force to be $F(t)$ constant value and not depend on time (t).

Then the equation of motion of the mechanical system at such a Lagrange function L (43) are as follows:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \cdot \ddot{x} + m_2 \cdot l \cdot (\ddot{\varphi} \cos \varphi - \sin \varphi \cdot \dot{\varphi}^2) = F; \\ g \cdot \sin \varphi + l \cdot \ddot{\varphi} + \ddot{x} \cos \varphi = 0. \end{cases} \tag{44}$$

For $\varphi \ll 1$ let us linearize the equations of the system (44) ($\sin \varphi \approx \varphi$; $\cos \varphi \approx 1$):

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \cdot \ddot{x} + m_2 \cdot l \cdot \ddot{\varphi} = F; \\ g \cdot \varphi + l \cdot \ddot{\varphi} + \ddot{x} = 0. \end{cases} \tag{45}$$

After simple transformations, from (45) we can obtain:

$$(m_1 + m_2) \cdot g \cdot \varphi + m_1 \cdot l \cdot \ddot{\varphi} = -F, \tag{46}$$

or:

$$\frac{(m_1 + m_2) \cdot g \cdot \varphi}{m_1 \cdot l} + \ddot{\varphi} = \frac{-F}{m_1 \cdot l}. \quad (47)$$

Note the notation:

$$\Omega^2 = \frac{g \cdot (m_1 + m_2)}{m_1 \cdot l}, \quad (48)$$

where: Ω – is the natural frequency of oscillations of the system under consideration. From (47), (48) it is easy to obtain:

$$\varphi = \frac{\left\{ \ddot{\varphi} + \frac{F}{m_1 \cdot l} \right\} \cdot (-1)}{\Omega^2}. \quad (49)$$

One shall examine the laws of motion $\varphi(t)$ with this mechanical system (within the model's parameters, that is being considered, and the approximation $\varphi \ll 1$), that lays out the nest motion quality criteria (at the start, for the duration τ_{II}):

$$I^* = \left\{ \frac{1}{\tau_{II}} \cdot \int_0^{\tau_s} \{\varphi\}^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \min. \quad (50)$$

Given (49), the criterion (50) can be represented in this form:

$$I^* = \left\{ \frac{1}{\tau_{II}} \cdot \int_0^{\tau_s} \left[\frac{\ddot{\varphi} + \frac{F}{m_1 \cdot l}}{\Omega^2} \right]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \min. \quad (51)$$

A necessary condition for the realization of criterion (50) or (51) is the Euler-Poisson equation:

$$\varphi^{(IV)} = 0, \quad (52)$$

with condition that $F = const.$

We will search for the solution of equation (52) in the form of cubic spline by t :

$$\varphi(t) = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3. \quad (53)$$

Constants (b_0, b_1, b_2, b_3) for the crane starting mode is found from the following terminal conditions:

$$\varphi|_{t=0} = 0; \quad \dot{\varphi}|_{t=0} = 0; \quad \ddot{\varphi}|_{t=0} = -\frac{F}{m_1 \cdot l}; \quad \dot{\varphi}|_{t=\tau_s} = -\frac{V_0}{l}. \quad (54)$$

Therefore:

$$b_0 = 0; \quad b_1 = 0; \quad b_2 = -\frac{F}{2 \cdot m_1 \cdot l}; \quad b_3 = \left\{ \frac{\left(-\frac{V_0}{l} \right) + \frac{F}{m_1 \cdot l} \cdot \tau_s}{3 \cdot \tau_s^2} \right\}. \quad (55)$$

In (54), (55) V_0 – speed of steady motion of the crane trolley at the end of start-up.

Finally, $\varphi(t)$ assumes the following form:

$$\varphi(t) = \left(-\frac{F}{2m_1 \cdot l} \right) \cdot t^2 + \left(\frac{F \cdot \tau_s}{m_1 \cdot l} - \frac{V_0}{l} \right) \cdot \frac{1}{3 \cdot \tau_s^2} \cdot t^3. \quad (56)$$

in (56) $t \in [0, \tau_s]$.

The second equation of the system (45) gives:

$$\ddot{x} = -\{g\varphi + l\ddot{\varphi}\} = -\left\{g \cdot \left[\left(-\frac{F}{2m_1 \cdot l} \right) \cdot t^2 + \left(\frac{F \cdot \tau_s}{m_1 \cdot l} - \frac{V_0}{l} \right) \cdot \frac{t^3}{3 \cdot \tau_s^2} \right] - \left[\frac{-F}{m_1} + \left(\frac{F \cdot \tau_s}{m_1} - V_0 \right) \cdot \frac{2t}{\tau_s^2} \right] \right\} \quad (57)$$

Twice integrating (57) at t with zero initial conditions ($x|_{t=0} = \dot{x}|_{t=0} = 0$), for $x(t)$:

$$x(t) = \frac{F \cdot t^2}{2m_1} - \left(\frac{F \cdot \tau_s}{m_1} - V_0 \right) \cdot \frac{t^3}{3 \cdot \tau_s^2} + \frac{F \cdot g \cdot t^4}{24 \cdot m_1 \cdot l} - g \cdot \left(\frac{F \cdot \tau_s}{m_1 \cdot l} - \frac{V_0}{l} \right) \cdot \frac{t^5}{60 \cdot \tau_s^2} \quad (58)$$

For $x_2(t) = x(t) + l \cdot \varphi(t)$:

$$x_2(t) = \frac{F \cdot g \cdot t^4}{24m_1 \cdot l} - g \cdot \left(\frac{F \cdot \tau_s}{m_1 \cdot l} - \frac{V_0}{l} \right) \cdot \frac{t^5}{60 \cdot \tau_s^2} \quad (59)$$

in (58), (59) $t \in [0, \tau_s]$.

The maximum load of the cable, as well as its current load $F_H(t)$, can be found from the relationship:

$$\begin{aligned} F_H(t) &= \frac{m_2 \cdot g}{l} \cdot |x_2(t) - x_1(t)| = \frac{m_2 \cdot g}{l} \cdot |\varphi(t)| \cdot l = m_2 \cdot g \cdot |\varphi(t)| = \\ &= m_2 \cdot g \cdot \left| \left(-\frac{F}{2m_1 \cdot l} \right) \cdot t^2 + \left(\frac{F \cdot \tau_s}{m_1 \cdot l} - \frac{V_0}{l} \right) \cdot \frac{t^3}{3 \cdot \tau_s^2} \right| \end{aligned} \quad (60)$$

$$[F_H(t)]_{\max} = F_H(t^*) \quad t^* = \left[\frac{F \cdot \tau_s^2}{(m_1 \cdot l)} \cdot \left(\frac{F \cdot \tau_s}{m_1 \cdot l} - \frac{V_0}{l} \right) \right]^{-1} \quad (61)$$

2.2. Braking mode. In the crane system-braking mode, the considerations given in paragraph 2.1 above are repeated. Only replacements should be made: $\tau_s \rightarrow \tau_B$; $F_s = F \rightarrow F_B$ and accept the following terminal conditions for the definition $\varphi(t)$:

$$\varphi|_{t=0} = 0; \quad \dot{\varphi}|_{t=0} = -\frac{V_0^*}{l}; \quad \ddot{\varphi}|_{t=0} = -\frac{F_B}{m_1 \cdot l}; \quad \varphi|_{t=\tau_B} = 0. \quad (62)$$

In (62) V_0^* – initial speed of uniform motion of the crane trolley, which decreases to zero at the moment of the end of the braking process, i.e. at $t = \tau_B$.

Coefficient $(\tilde{b}_0, \tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \tilde{b}_3)$ for denoting $\varphi(t)$ when braking, therefore:

$$\varphi(t) = \tilde{b}_0 + \tilde{b}_1 \cdot t + \tilde{b}_2 \cdot t^2 + \tilde{b}_3 \cdot t^3, \quad (63)$$

Accounting for (62) assumes the following form:

$$\begin{cases} \tilde{b}_0 = 0; \quad \tilde{b}_1 = -\frac{V_0^*}{l}; \quad \tilde{b}_2 = -\frac{F_B}{2m_1 \cdot l}; \\ \tilde{b}_3 = \frac{1}{3 \cdot \tau_B^2} \cdot \left\{ \frac{V_0^*}{l} + \frac{F_B \cdot \tau_B}{m_1 \cdot l} \right\}. \end{cases} \quad (64)$$

Therefore, the expression $\varphi(t)$ for braking assumes the following form:

$$\varphi(t) = \left(-\frac{V_0^*}{l} \right) \cdot t + \left(-\frac{F_B}{2m_1 \cdot l} \right) \cdot t^2 + \frac{1}{3 \cdot \tau_B^2} \cdot \left\{ \frac{V_0^*}{l} + \frac{F_B \cdot \tau_B}{m_1 \cdot l} \right\} \cdot t^3 \quad (65)$$

For $\ddot{x}(t)$ from the expression (45):

$$\ddot{x} = -(g \cdot \varphi + l \cdot \ddot{\varphi}) = (-g) \cdot \left(-\frac{V_0^*}{l} \right) \cdot t + \left(+\frac{F_B \cdot g}{2m_1 \cdot l} \right) \cdot t^2 + \frac{(-g)}{3 \cdot \tau_B^2} \cdot \left(\frac{V_0^*}{l} + \frac{F_B \cdot \tau_B}{m_1 \cdot l} \right) \cdot t^3 + \frac{F_B}{m_1} - \frac{2t}{\tau_B^2} \cdot \left\{ V_0^* + \frac{F_B \cdot \tau_B}{m_1} \right\}. \quad (66)$$

Integrating twice over t (66) with the following initial conditions:

$$x|_{t=0} = 0; \quad \dot{x}|_{t=0} = V_0^*. \quad (67)$$

Then:

$$x(t) = \left(+\frac{gV_0^*}{6l} \right) \cdot t^3 + \frac{F_B \cdot g \cdot t^4}{24 \cdot m_1 \cdot l} + \frac{(-g)}{60 \cdot \tau_B^2} \cdot \left(\frac{V_0^*}{l} + \frac{F_B \cdot \tau_B}{m_1 \cdot l} \right) \cdot t^5 + \frac{F_B \cdot t^2}{2 \cdot m_1} + V_0^* \cdot t - \frac{t^3}{3 \cdot \tau_B^2} \cdot \left\{ V_0^* + \frac{F_B \cdot \tau_B}{m_1} \right\}. \quad (68)$$

$x_2(t) = x(t) + l \cdot \varphi(t)$ come from the relation:

$$x_2(t) = \left(+\frac{gV_0^*}{6l} \right) \cdot t^3 + \frac{F_B \cdot g \cdot t^4}{24m_1 \cdot l} + \frac{(-g)}{60 \cdot \tau_B^2} \cdot \left(\frac{V_0^*}{l} + \frac{F_B \cdot \tau_B}{m_1 \cdot l} \right) \cdot t^5. \quad (69)$$

The rope load as well as its maximum value for the braking mode of the crane system can be found from the relations:

$$F_H(t) = \frac{m_2 \cdot g}{l} \cdot |x_2(t) - x_1(t)| = m_2 \cdot g \cdot |\varphi(t)| = m_2 \cdot g \cdot |\varphi(t)| = m_2 \cdot g \cdot \left| \left(-\frac{V_0^*}{l} \right) \cdot t - \frac{F_B \cdot t^2}{2m_1 \cdot l} + \frac{1}{3 \cdot \tau_B^2} \cdot \left(\frac{V_0^*}{l} + \frac{F_B \cdot \tau_B}{m_1 \cdot l} \right) \cdot t^3 \right|. \quad (70)$$

$$[F_H(t)]_{\max} = F_H(t^{**}), \quad t^{**} \in [0, \tau_B], \quad (71)$$

where t^{**} is found as a real positive root of the quadratic equation:

$$\frac{1}{\tau_B^2} \cdot \left(\frac{V_0^*}{l} + \frac{F_B \cdot \tau_B}{m_1 \cdot l} \right) \cdot t^2 - \frac{F_B \cdot t}{m_1 \cdot l} - \frac{V_0^*}{l} = 0. \quad (72)$$

It should be noted that both in the operating mode of the crane system at its start-up and at its deceleration $\varphi(t) \neq 0$ with $t > \tau_s$ else $t > \tau_B$, i.e. there are residual vibrations of the load on the rope.

When approaching $t \rightarrow \tau_s$ else $t \rightarrow \tau_B$ one (for $\varphi(t)$ else $\dot{\varphi}(t)$) will be non-zero and therefore, due to the inertial properties of the system, residual oscillations will exist.

The results obtained in this study allow only to determine such modes of crane system startup/braking, at which during the transition period ($t \in [0, \tau_s]$ else $t \in [0, \tau_B]$) oscillations of the load on the rope are minimized. Actually, such modes of operation of the hoisting mechanism of the bridge/bridge crane are called optimal in this paper.

Conclusion:

1. Dynamic analysis of transient modes of motion (startup/braking) of hoisting mechanisms of overhead/urban cranes has been carried out. The scientific novelty of the work consists in the fact that for the first time correct (terminal) initial and final conditions of motion of the crane system in the transient mode of its functioning (in the period of start-up/braking), in which there is (and in the conditions stated) a physical cause of such motion, and the laws of motion are constructed by means of spline functions (in time), and the defect of the time spline is equal to zero (that is, the number of terminal conditions corresponds to the number of uncertain constants of the time spline). The latter circumstance indicates the correctness of the law of motion of the crane system in time defined in this way.

2. Within the framework of classical models of motion of the crane system (Lobov N.A. [3] and Landau L.D. [1]) the basic parameters of stresses in ropes and kinematic characteristics, at which pendulum oscillations of a cargo are minimized exactly during the whole transient mode of functioning, are determined.

3. The results obtained in the work can be further used to clarify and improve the existing engineering methods for calculating the parameters of lifting mechanisms of bridge/grading type cranes in order to reduce the negative impact of pendulum oscillations arising in the system.

References

- [1] L.D. Landau, E.M. Lyfshyts, *Mekhanika*. T. 1. M.: Nauka, 1988.
- [2] V.S. Loveikin, Yu.V. Chovniuk, A.P. Liashko, "The cranes vibrating systems controlled by mechatronic devices with magnetorheological fluid: The nonlinear mathematical model of behavior and optimization of work regimes", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, Issue 6, pp. 97-102, 2014.
- [3] N.A. Lobov, *Dinamika gruzopod'yomnyh kranov*. M.: Mashynostroenye, 1987.
- [4] V.S. Loveikin, K.I. Pochka, "Synthesis of camshaft driving mechanism in roller molding installation with combined motion mode according to acceleration of third order", *Science & Technique*, Issue 3, vol. 16, pp. 206-214, 2017.
- [5] A. Okun, Y. Los, "The controllability function method", *U.P.B. Scientific Bulletin. Series D: Mechanical Engineering*, Issue 3, vol. 78, pp. 3–8, 2016.
- [6] V.S. Loveikin, Yu.O. Romasevych., Yu.V.Chovniuk, I.O. Kadykalo. *Dynamika y optymizatsiia pidiomno-transportnykh mashyn*. Monohrafiia. K.: TsP «KOMPRINT», 2019.
- [7] V.S. Loveikin, Y.O. Romasevych, "Dynamic optimization of a mine winder acceleration mode", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, Issue 4, pp. 55-61, 2017.
- [8] O. Grigorov, E. Druzhyin, G. Anishchenko, M. Strizhak, V. Strizhak, "Analysis of Various Approaches to Modeling of Dynamics of Lifting-Transport Vehicles, Issue 7(4.3), pp. 64-70, 2018.
- [9] Yu.V. Chovniuk, M.H. Dikteruk, I.M. Sivak, Yu.O. Humeniuk, V.T. Kravchuk, *Modeliuvannia, analiz ta optymizatsiia dynamiky rezhymiv rukhu vantazhopidomnykh mashyn*. Monohrafiia. K.: NUBIPU, 2018.
- [10] T. Haniszewski, "Modeling the dynamics of cargo lifting process by overhead crane for dynamic overload factor estimation", *International Journal of Vibroengineering*, Issue 1, vol. 19, pp. 75-86, 2017.
- [11] C.M. Niu, H.W. Zhang, H. Ouyang, "A comprehensive dynamic model of electric overhead cranes and the lifting operations. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers", *Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 226, Issue 6, pp. 1484-1503, 2012.
- [12] V.K. Augustaitis, V. Gican, A. Jakstas, B. Spruogis, V. Turla, "Research of lifting equipment dynamics", *International Journal of Vibroengineering*, Issue 4, vol. 16, pp. 2082-2088, 2014.
- [13] D.C.D. Oguamanam, J.S. Hansen, "Dynamic response of an overhead crane system", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 213, Issue 5, pp. 889-906, 1998.
- [14] C. Chin, A.H. Nayfeh, E. Abdel-Rahman, "Nonlinear dynamics on a boom crane", *Journal of Vibration and Control*, vol. 7, Issue 2, pp. 199-220, 2001.
- [15] R.M. Ghigliazza, P. Holmes, "On the dynamics of cranes, or spherical pendula with moving supports", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 37, Issue 6, pp. 1211-1221, 2002.
- [16] D.C.D. Oguamanam, J.S. Hansen, G.R. Heppler, "Dynamics of a three-dimensional overhead crane system", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 242, Issue 3, pp. 411-426, 2001.
- [17] Ju F., Y.S. Choo, F.S. Cui, "Dynamic response of tower crane induced by the pendulum motion of the payload", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 43, pp. 376-389, 2006.
- [18] E.M. Abdel-Rahman, A.H. Nayfeh, Z.N. Masoud, "Dynamics and control of cranes: a review", *Journal of Vibration and Control*, vol. 9, pp. 863-908, 2003.
- [19] R.M. Ghigliazza, P. Holmes, "On the dynamics of cranes, or spherical pendula with moving

- supports", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 37, pp. 1211-1221, 2002.
- [20] M.P. Spathopoulos, D. Fragopoulos, "Pendulation control of an offshore crane", *International Journal of Control*, vol. 77, Issue 7, pp. 654-670, 2004.
- [21] B. Jerman, P. Podržaj, J. Kramar, "An investigation of slewing-crane dynamics during slewing motion development and verification of a mathematical model", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 46, pp. 729-750, 2004.

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ РУХУ ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ МЕХАНІЗМІВ МОСТОВИХ/МІСТОБУДІВЕЛЬНИХ КРАНІВ

¹Човнюк Ю.В., к.т.н., доцент,
ychovnyuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0608-0203,

¹Чередніченко П.П., доцент,
petro_che@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7161-661X

¹Шудра Н.С., ст. викладач,
Shudra_n@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5416-7680

¹Київський Національний університет будівництва та архітектури
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, 03037, Україна

²Козупиця С.І., доцент,
sirko58@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3038-4431,

²Національний авіаційний університет
Любомира Гузара пр., 1, м. Київ, 03058, Україна

Анотація. Проведене дослідження режимів роботи вантажопідйомних механізмів і машин, зокрема, мостових та містобудівельних кранів. На основі динамічного аналізу режимів роботи механізмів вказаних машин встановлений характер виникнення навантажень у їх пружних елементах (канатах). Виконано синтез оптимальних перехідних режимів роботи (пуск/гальмування) містобудівельних та мостових кранів. Використані моделі Л.Д. Ландау та Н.А. Лобова для фізико-механічного аналізу руху вказаних машин, на основі котрих із залученням методів класичного варіаційного числення отримані аналітичним шляхом закони руху вантажу та вантажного візка подібних кранів, які оптимізують (мінімізують) неминуче виникаючі маятникові коливання вантажу на канаті (як у період пуску крана, так і при його гальмуванні, до повної зупинки).

Оцінка режимів руху у роботі здійснення шляхом використання критерію з підінтегральними функціями у вигляді «енергії» пришвидшень вищих порядків (третього, четвертого і т.д.). Саме такі критерії використовуються при виборі режимів руху вантажопідйомних механізмів кранів мостового/містобудівельного типу, які мають у своєму складі пружні елементи (канати). Вказаний підхід дає можливість досягнути неперервності функцій швидкостей і пришвидшень різних ланок системи, що і призводить до значного зменшення їх коливань. Аналіз режимів руху системи, яка описується основною координатою руху і пружними координатами, дозволив встановити закономірність використання запропонованого критерію для мінімізації пружних коливань окремих ланок (канатів) вантажопідйомного механізму крана.

Результати даного дослідження можуть бути у подальшому використані для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку навантажень у гнучких/пружних елементах (канатах) мостових та містобудівельних кранів як при проектуванні вантажопідйомних механізмів, так і у режимах їх реальної експлуатації при застосуванні у керуванні рухом вантажного візка мехатронних систем управління.

Ключові слова: аналіз, динаміка, оптимізація, перехідні режими руху, пуск, гальмування, вантажопідйомні механізми, мостові та містобудівельні крани.

Стаття надійшла до редакції 7.11.2023

**АКТИВАЦІЯ ЦЕМЕНТУ І ЇЇ ВПЛИВ НА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ
ЦЕМЕНТОВМІЩУЮЧИХ КОМПОЗИЦІЙ**

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

¹**Пірогов Д.О.**, аспірант,
pirogovdima45@gmail.com, ORCID: 0009-0003-4096-3186
¹*Одеська державна академія будівництва та архітектури*
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. У статті розглянуті питання, які пов'язані з механохімічною активацією цементного в'язучого в спеціально сконструйованому роторному протитечійному млині. Приведений короткий опис конструкції протитечійного млина дає загальне уявлення про принцип його дії як активатора поверхневої зони мінерального в'язучого. Зазвичай, позитивною характеристикою мінеральних в'язучих є їх швидкий набір міцності. Тому актуальними є наукові дослідження, які пов'язані з розробкою технології, спрямованої на інтенсифікацію процесів структуроутворення цементного тіста та каменю на його основі. Застосування даної технології дозволяє суттєво підвищити питому поверхню цементу в процесі його активації, скоротити терміни тужавлення, підвищити кількість хімічно зв'язаної води та інтенсифікувати екзотермічний розігрів тверднучого цементного каменю. Наведені експериментальні дані дозволили оптимізувати термін активації в'язучого, який коливався в діапазоні від 60 до 600 сек. Встановлено, що оптимальним, з точки зору енергоємності процесу, є термін активації в'язучого впродовж 300 сек. Протягом цього терміну активації спостерігається зростання питомої поверхні цементу в середньому на 8...10 %, прискорення термінів тужавлення на 50...60 хв, зростання кількості хімічно зв'язаної води в 28-и денному віці з 13 до 16,3 %, зростання максимальної температури екзотермічного розігріву цементного каменю з 53,8 до 64,0 °С. Подальше зростання терміну активації (до 600 сек) незначно впливає на зміну перерахованих властивостей. Вплив механохімічної активації в значній мірі відзеркалюється на міцності цементного каменю на стиск. Встановлено, що активація цементу впродовж 300 сек викликає зростання міцності цементного каменю на стиск з 48 до 57 МПа, тобто майже на 20%. Підсилює ефект механохімічної активації цементу введення до його складу кварцового піску. Експериментально встановлено, що активація цементу з добавкою 20% кварцового піску підвищує міцність наповненого цементного каменю майже на 30% по відношенню до міцності каменю на бездобавочному цементі, який механоактивації не підлягав.

Ключові слова: цемент, активація, екзотермічний розігрів, механоактивоване в'язуче.

Вступ. За рахунок зростання активності мінеральних в'язучих можливо вирішувати ряд важливих задач технологічного і економічного напрямів, пов'язаних як із підвищенням механічних і експлуатаційних характеристик бетонів, так із зниженням їх енерго- і матеріалоємності. Серед різноманітних форм активації в'язучих видне місце займають механохімічні методи, які пов'язані з використанням млинів спеціальних конструкцій. Використання таких млинів дозволяє одержувати кондиційні будівельні матеріали при зниженій витраті мінеральних в'язучих і, зокрема, портландцементу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні способи активації гідратації і структуроутворення цементовміщуючих композицій дуже різноманітні і об'єднані тільки спільністю технологічної мети. До основних методів активації мінеральних в'язучих відносяться: а) більш тонкий помел [1-3]; б) введення поверхньо-активних речовин в процесі помелу клінкеру [4-7]; в) введення в склад портландцементу активних мінеральних добавок [8-14]. Серед методів підвищення активності в'язучих особливе місце займають механохімічні

способи активації, які досить легко ув'язуються з іншими способами фізико-хімічної активації (віброактивація, ультразвукова обробка, магнітний вплив та ін.). Перспективним напрямом слід вважати механохімічну обробку мінеральних в'язучих в трибозмішувачах особливих конструкцій, які досить ефективно забезпечують зростання поверхневої енергії часток в'язучого [15, 16]. Відомо, що внаслідок механічної дії на дисперсні частки в'язучого на їх поверхні виникають, хоч і на дуже короткий час, високоенергетичні стани.

Виходячи з цього, можливо констатувати, що незалежно від характеру механічного впливу на тонкодисперсні частки в'язучого в початковий момент виникає пружна деформація, яка призводить до зміни довжини зв'язків у твердому тілі. Перевищення пружної деформації викликає розвиток пластичної, незворотної деформації і, як наслідок, руйнування. В момент хаотичних переміщень часток, які летять з великою швидкістю, в місцях їх зіткнень в зонах субмікроскопічної деформації відбувається акумулювання енергії. Внаслідок цього процесу в місцях контактів утворюються на дуже короткий час збуджені стани, які в значній мірі послабляють кристалічні решітки. Експериментальні дослідження показали, що в області удару утворюється яскраво виражена разупоряднена структура [17]. Таким чином можливо констатувати, що внаслідок механохімічної активації на всій поверхні дисперсного матеріалу розвивається гранична зона, упорядкованість якої безперервно знижується. Зростання інтенсивності активації тонкодисперсних часток приведе до того, що первісні пластичні деформації змінюються появою тріщин з утворенням нових поверхонь. Для досягнення високого ступеня активації тонкодисперсних часток в'язучого використовується устаткування, у якому ефективно здійснюється тонке подрібнення матеріалу до утворення значної питомої поверхні. Таким чином, одержання цементу з підвищеною активністю пов'язано із зростанням тонини помелу в'язучого. Кульові млини, які використовуються для активації цементу, значно підвищують собівартість продукції за рахунок значного зростання витрати електроенергії. Для вирішення цієї проблеми пропонується спосіб стираючого подрібнення, який реалізується в кульових млинах, замінити на інший спосіб тонкого подрібнення. Виходячи з того, що найбільш перспективним напрямом зниження собівартості активації цементу є зниження енергоємності самого процесу подрібнення, то використання таких агрегатів як струменеві млини, може розглядатися як безальтернативний спосіб підвищення активності в'язучого. Перспективним напрямом можливо рахувати механохімічну обробку портландцементу в спеціально сконструйованому роторному протитечійному млину, який є різновидом струменевих млинів [18].

Мета та методи дослідження. Аналіз наукових робіт, пов'язаних з даною тематикою, зумовив мету даної роботи, яка полягає в покращенні фізико-технічних характеристик в'язучого за рахунок його механохімічної активації. В експериментальних дослідженнях для активації в'язучого використовувався спеціально сконструйований роторний протитечійний млин. В корпусі млина, який має вигляд двох зварених між собою циліндрів, встановлено два вертикальних ротори. Кожний із роторів складається з валу, до якого кріпляться пластини із високоміцної сталі. В зазор між роторами через патрубок, який розташований у верхній частині млина, подається матеріал для тонкого помелу. В нижній зоні млина, на одній осі із живильним патрубком, знаходиться патрубок для виходу меленого матеріалу. Після запуску млина обидва ротори починають обертатись на зустріч один одному із швидкістю 11000 об/хв. При обертанні роторів перед пластинами створюється область підвищеного повітряного тиску, який змушує рухатись подрібнюваний матеріал по радіальній траєкторії. Розігнаний кожним із роторів до певної швидкості подрібнюваний матеріал переміщується в нижню частину млина і транспортується в дозатор бетонозмішуючого відділення. Програмою досліджень передбачалося вивчення впливу механохімічної активації в'язучого в протитечійному млині на властивості цементу (питома поверхня), цементного тіста (нормальна густина, терміни тужавлення, екзотермія твердіючого цементного тіста, кількість хімічно зв'язаної води) і каменю на його основі (міцність на стиск цементного каменю в 28-и денному віці).

Результати досліджень. В дослідженнях, пов'язаних з визначенням впливу активації на властивості цементу та цементного тіста, використовувався сульфатостійкий

шлакопортландцемент ССШПЦ М400-Д-60. Для вивчення впливу терміну механохімічної активації цементу на зміну його питомої поверхні в'яжуче піддавалось обробці в протитечійному млину протягом 60, 180, 300 та 600 сек. Для контролю використовувалося в'яжуче, яке активації не підлягало. Приведені в табл. 1 експериментальні дані свідчать про те, що механохімічна обробка в'яжучого в протитечійному млину приведе до зростання його питомої поверхні з 415 м²/кг (активація відсутня) до 450 м²/кг (активація протягом 600 сек).

Таблиця 1 – Вплив терміну активації на зміну питомої поверхні цементу

Вид випробування	Термін активації в'яжучого, сек				
	0 (контроль)	60	180	300	600
Питома поверхня, м ² /кг	415	430	440	445	450

Слід відмітити досить інтенсивне зростання питомої поверхні цементу в перші 60 сек активації (від 415 до 430 м²/кг). В подальшому зростання питомої поверхні сповільнюється, досягаючи 445 м²/кг після 300 сек активації. Подальша обробка цементу в протитечійному млині (від 300 до 600 сек) викликає незначний приріст питомої поверхні (не більше ніж на 5 м²/кг – з 445 до 450 м²/кг).

Експериментально встановлено, що активація цементу в роторному протитечійному млину викликає зростання нормальної густоти в'яжучого з 28,0 (активація відсутня) до 29,0% (активація впродовж 300 сек), табл. 2.

Таблиця 2 – Вплив терміну активації цементу на зміну нормальної густоти цементного тіста

Вид випробування в'яжучого	Термін активації в'яжучого, сек				
	0 (контроль)	60	180	300	600
Нормальна густота, %	28,0	28,4	28,7	29,0	29,2

Зростання терміну активації цементу від 300 до 600 сек викликає незначне зростання нормальної густоти в'яжучого з 29,0 до 29,2 %. Таким чином, можливо вважати в розрахунках, пов'язаних з підбором складу бетону, що зростання нормальної густоти цементного тіста внаслідок механоактивації в'яжучого не перевищує 3...5 % (в порівнянні з контролем). Експериментальні дані термінів тужавлення цементного тіста нормальної густоти свідчать про те, що активація цементу в протитечійному млині викликає прискорення як початку, так і кінця тужавлення, табл. 3.

Таблиця 3 – Вплив активації цементу в роторному млині на терміни тужавлення цементного тіста нормальної густоти

Термін активації, сек	Початок тужавлення, год-хв	Кінець тужавлення, год-хв
0	2 - 55	4 - 50
60	2 - 25	4 - 20
180	2 - 05	4 - 00
300	1 - 55	3 - 40
600	1 - 50	3 - 30

Слід відзначити, що активація цементу протягом перших 300 сек викликає скорочення термінів тужавлення (в порівнянні з контролем) в середньому на 1 год. Подальша обробка цементу в протитечійному млині практично не позначається на скороченні як початку, так і кінця тужавлення.

В дослідженнях, які пов'язані з визначенням механізму гідратації активованого цементу до першочергових задач відносять визначенню кінетичних параметрів процесів структуроутворення і, зокрема, кількості хімічно зв'язаної води. Як відзначалося раніше, в результаті зіткнення двох твердих тіл в локальній зоні спостерігається руйнування кристалічної

решітки, що приведе до зародження тріщин в зернах цементу. Зіткнення часток в'язучого викликає зростання питомої поверхні цементу. Зростання питомої поверхні викликає появу нової кількості активних центрів в одиниці об'єму, що веде до зміни умов контактування часток цементу як між собою, так і з дисперсійним середовищем. Таким чином, взаємодія часток цементу при їх зіткненні викликає аморфізацію їх поверхонь, що веде до підвищення їх реакційної здатності, яка віддзеркалюється кількістю хімічно зв'язаної води. Для визначення кількості хімічно зв'язаної води передбачалось виготовлення цементного тіста з В/Ц = 0,28 (нормальна густина) із якого виготовлялись зразки (по одному для кожного терміну активації – 60, 180, 300 і 600 сек), і які витримувалися в нормальних умовах протягом 1, 3 та 28 діб. Через задані терміни тверднення зразки тонко подрібнювалися і підлягали висушуванню при температурі 105...110°C до постійної маси. Висушену навіску (приблизно 5г) розміщували у порцеляновому тиглі і піддавали прожарюванню до постійної маси при температурі 950 – 1000°C. Кількість хімічно зв'язаної води B (в %) розраховувалася за формулою (1):

$$B = \frac{a-b}{a} \cdot 100, \quad (1)$$

де: a – маса абсолютно сухого зразка до прожарювання, г;

b – маса прожареного зразка, г.

Приведені графічні залежності, рис. 1, свідчать про те, що активація зерен цементу викликає підвищення кількості хімічно зв'язаної води (в порівнянні з цементним каменем, в'язуче якого активації не підлягало). Аналіз графічних залежностей показує, що термін активації цементу впливає на кількість хімічно зв'язаної води, досягаючи максимального значення при його 10-ти хвилинній обробці в роторному протитечійному млині. Слід відзначити, що основна кількість хімічно зв'язаної води досягається при активації цементу протягом 300 сек. Подальше зростання терміну активації (до 600 сек) незначно впливає на збільшення кількості хімічно зв'язаної води і не перевищує 3...5 %.

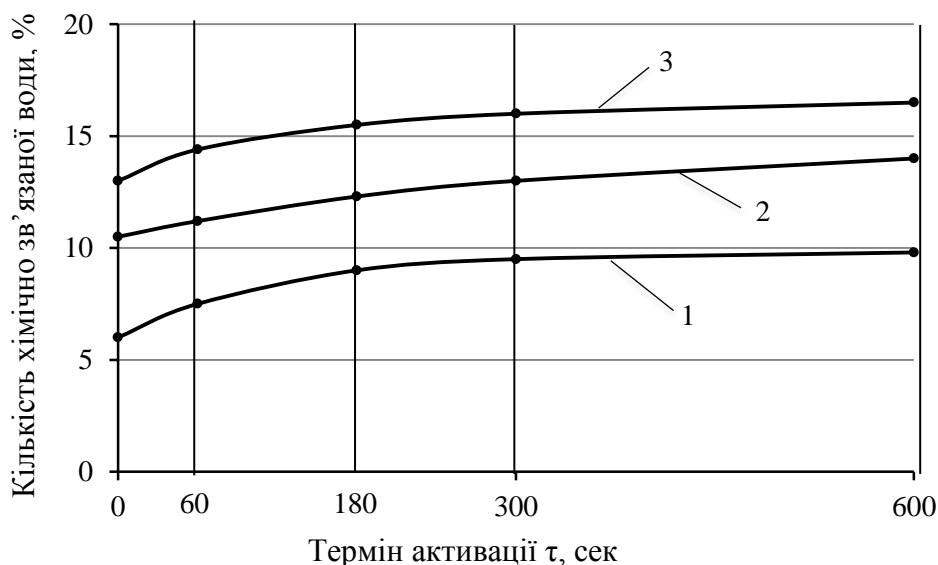


Рис. 1. Вплив терміну активації цементу (сек) на кількість хімічно зв'язаної води (%) в цементному камені:

1, 2, 3 – терміни тверднення цементного каменю 1, 3 та 28 діб відповідно

Важливою характеристикою в'язучого є його кінетика екзотермічного розігріву, яка досліджувалася за допомогою термосної установки з використанням сосуда Д'юара. Для визначення екзотермічного розігріву готувалися зразки із цементного тіста з В/Ц=0,28. Фіксація температури тверднучого цементного тіста здійснювалася через кожну годину до того моменту, коли наступний показник розігріву не змінювався по абсолютній величині або був нижче попереднього. Механоактивація цементу здійснювалася в роторному протитечійному млині протягом 60, 180, 300 і 600 сек. Для контролю виготовлявся зразок із

цементного тіста на немеханоактивованому в'язучому. Результати екзотермічного розігріву тверднучого цементного каменю приведені в табл. 4.

Одержані експериментальні результати свідчать про те, що активація цементу в роторному протитечійному млині суттєво впливає на кінетику екзотермічного розігріву твердіючого цементного каменю. Слід відмітити якісний вплив зростання терміну активації (до 300 сек) на величину максимального розігріву цементного каменю. Зростання терміну активації цементу від 300 до 600 сек сприяє підвищенню екзотермічного розігріву, але в значно меншій мірі, ніж при активації впродовж 300 сек. Так, якщо зростання терміну активації від 0 до 300 сек сприяє зростанню максимальної температури розігріву від 53,8°C до 64,0°C (активація – 300 сек), то подальша активація цементу (від 300 до 600 сек) викликає зростання температури розігріву цементного каменю не більше, ніж на 2,1 °С.

Таблиця 4 – Вплив активації на екзотермічний розігрів цементного каменю

Термін активації цементу, сек	Початкова тем-ра цем. тіста, С	Температура екзотермічного розігріву цементного каменю через, год											
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
0	20,6	20,6	20,6	20,7	21,0	22,0	26,2	30,0	34,8	44,5	53,8	53,6	53,1
60	20,4	20,4	20,4	21,0	21,8	22,7	26,9	32,8	39,2	50,2	59,2	59,2	58,6
180	20,5	20,5	20,7	21,8	22,6	25,8	31,4	38,0	49,1	61,0	60,8	60,4	59,4
300	20,3	20,3	20,3	23,2	26,4	31,5	40,6	51,1	64,3	64,3	64,0	63,8	63,6
600	20,5	20,5	20,5	23,9	28,4	34,0	42,4	57,8	66,2	66,2	66,1	66,0	65,5

Експериментально визначався також вплив механохімічної активації цементу з добавкою кварцового піску (в кількості до 50 % маси в'язучого) на міцність наповненого цементного каменю в 28-и денному віці. В цьому разі в дослідженнях використовувався портландцемент ПЦ П/А-Ш-500 з високим вмістом клінкеру (від 80 до 94%) та кварцовий пісок з $M_k=2,5$. Механохімічна активація портландцементу, а також суміші (портландцемент + кварцовий пісок) в роторному протитечійному млині здійснювалася протягом 60, 180, 300 і 600 сек. Одержане цементно-піщане в'язуче після механоактивації трактується як змішане в'язуче. Для контролю використовувався портландцемент з добавкою немеленого кварцового піску в тій же кількості (від 10 до 50 % маси цементу). Одержана суміш механоактивації не підлягала. В експерименті визначалася міцність на стиск зразків-балочок розміром $4 \times 4 \times 16$ см, які були виготовлені з використанням змішаного в'язучого. Витрата води визначалася діаметром розпливу цементного тіста на приборі Суттарда в діапазоні 90 ± 5 мм. Наведені на рис. 2 експериментальні криві свідчать про те, що активація змішаного в'язучого викликає підвищення міцності на стиск цементного каменю в зоні максимуму з 52 МПа (термін активації 60 сек) до 62 МПа (термін активації 300 сек), тобто майже на 20 %. Зростання терміну активації до 600 сек незначно впливає на зростання міцності цементного каменю і не перевищує 3...5 %. Слід відмітити неоднозначний вплив вмісту кварцового піску на міцність цементного каменю для різних технологій виготовлення в'язучого. Якщо для контрольних зразків характерно зниження міцності на стиск при зростанні вмісту в цементі кварцового піску, то для цементного каменю на змішаному в'язучому спостерігається підвищення міцності із зростанням витрати кварцового піску. Максимальний приріст міцності спостерігається при введенні в змішане в'язуче 20 % кварцового піску. В цьому разі міцність на стиск цементного каменю стає рівною 62 МПа (термін активації 300 сек), що на 10 % перевищує міцність бездобавочного цементного каменю на механоактивованому портландцементі.

Слід відмітити, що міцність цементного каменю на змішаному в'язучому з 20%-ною добавкою кварцового піску майже на 30 % перевищує міцність цементного каменю на портландцементі, який механоактивації не підлягав.

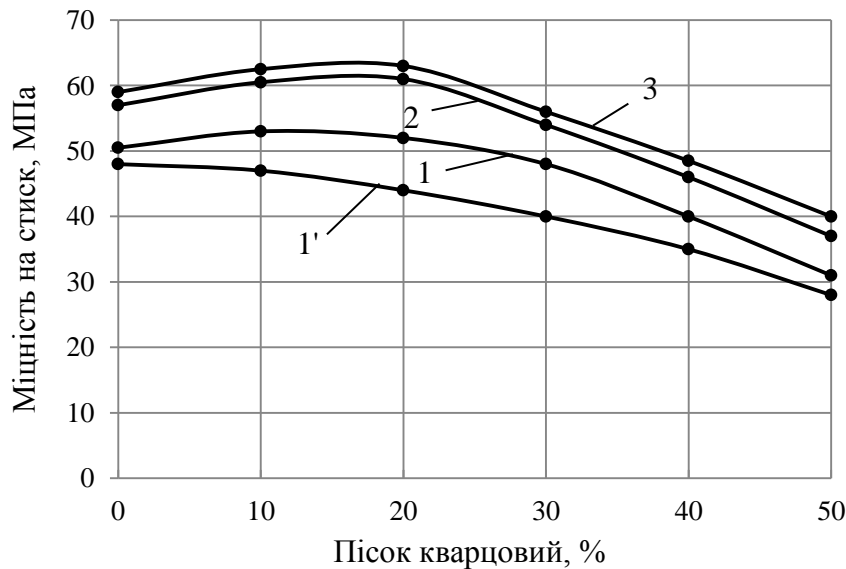


Рис. 2. Вплив вмісту кварцового піску на міцність цементного каменю в віці 28-и днів:
1, 2, 3 – цементний камінь на змішаному в'язучому, активованого протягом 60, 300 і 600 сек;
1' – цементний камінь на немеханоактивованому цементі з добавкою кварцового піску
(контроль)

Висновки.

1. Експериментальні дані свідчать про те, що активація цементу в роторному протитечійному млині викликає підвищення швидкості реакції гідратації в'язучого, що відображається на скороченні термінів тужавлення цементу, підвищенні кількості хімічно зв'язаної води, інтенсифікації екзотермічного розігріву та зростанні міцності на стиск цементного каменю.

2. Одержані експериментальні результати свідчать про те, що оптимальний термін активації цементу в протитечійному млині не перевищує 300 сек. Подальше зростання терміну активації незначно впливає на покращення досліджуваних характеристик як цементу, так і тверднучого цементного каменю.

Література

1. Сокольцов В.Ю., Шпілер Г.С. Вплив стану кремнезему на його реакційну здатність. *Мат-ли VI міжнародної науково-технічної WEB конференції "Композиційні матеріали"*, Київ: НТТУ. КПІ, 2012. С.64-66.
2. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Проектування складів бетонів. Монографія. Рівне: НУВГП, 2015. 353с.
3. Дворкін Л.Й. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони. Дворкін Л.Й., Бабич Є.М., Житковський В.В., Бордюженко О.М., Кочкар'єв Д.В., Філіпчук С.В., Ковалик І.В., Ковальчук Т.В., Скрипник М.М. Рівне: НУВГП, UNSPECIFIED, 2017. 331с.
4. Johann Plank, Christian Hirsch. Impact of zeta potenzial of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption. *Cement and Concrete Research: Germany*, 2007. №37. P. 537-542.
5. Ушеров-Маршак О.В. Хімічні і мінеральні добавки в бетон. Харків: Колорит, 2005. 280с.
6. Ушеров-Маршак А.В., Кабусь А.В. Функціонально-кінетический анализ влияния добавок на твердение цементов. *Неорганические материалы*, 2016. Том 52, №4. С. 479-484.
7. Соболев Х.С. Концепція застосування модифікованих композиційних цементів у будівельному виробництві. *Вісник НУЛП: Теорія і практика будівництва*, 2004. №520. С.179-182.
8. Соболев Х.С., Марків Т.Є, Саницький М.А., Когуц Г.В. Вплив активних мінеральних додатків на властивості композиційних цементів. *Вісник НУЛП: Хімія, технологія речовин та їх застосування*, 2003. №488. С. 274-278.
9. Токарчук В.В., Сокольцов В.Ю., Свідерський В.А. Вплив складу мінеральних

- добавок на властивості цементів. *Технологический аудит и резервы производства*, 2014. №3(5). С. 9-12. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tatrv_2014_3.
10. Giergiczny Z., Malolepszy J., Szwabowski J., Sliwinski J. Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonow nowej generacji. *Gorazdze cement*. Opole, 2002. 191s.
11. Composite cements modified by chemical admixtures. *Proc. International conference*. Kosice (Slovakia), 2005. P. 102-107.
12. Рунова Р.Ф., Носовський Ю.Л. Технологія модифікованих будівельних розчинів. Київ: КНУБА, 2007. 256 с.
13. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Geviuk J. Properties of Portland-composite cements with zeolite tuff. *Journal of Civil Engineering Environment and Architecture, JCEEA*. 2018. Т. XXXV. № 65(3/18). P. 25-34.
14. Троян В.В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Київ: Аспект-Поліграф, 2010. 228 с.
15. Барабаш І.В. Механохімічна активація мінеральних в'язучих речовин. Одеса: Астропринт, 2002. 100с.
16. Barabash I.V., Babii I.M., Streltsov K.O. Intensive separate technology and its influence on the properties of cement-water compositions, solutions and concretes on their basis. *Modern construction and architecture*, 2022. Issue № 2. P. 44-51.
17. Хайнике Г. Трибохимия. М.: Мир, 1987. 584 с.
18. Пірогов Д.О., Барабаш І.В. Вплив режиму активації на властивості цементу, цементного тіста та каменю на його основі. *Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції "Структурутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій"*, 2023, Одеса: ОДАБА. С. 109-110.

References

- [1] V.Iu. Sokoltsov, H.S. Shpiler, "Vplyv stanu kremnezemu na yoho reaktsiinu zdatnist", *Mat-ly VI mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi WEB konferentsii "Kompozytsiini materialy"*, Kyiv: NTTU. KPI, 2012, pp. 64-66.
- [2] L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin, *Proektuvannia skladiv betoniv*. Monohrafiia. Rivne: NUVHP, 2015.
- [3] L.I. Dvorkin, *Vysokomitsni shvydkotverdnuchi betony ta fibrobetony*. Dvorkin L.I., Babych Ye.M., Zhytkovskyi V.V., Bordiuzhenko O.M., Kochkarov D.V., Filipchuk S.V., Kovalyk I.V., Kovalchuk T.V., Skrypnyk M.M. Rivne: NUVHP, UNSPECIFIED, 2017.
- [4] Johann Plank, Christian Hirsch, "Impact of zeta potenzial of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption", *Cement and Concrete Research: Germany*, no. 37, pp. 537-542, 2007.
- [5] O.V. Usharov-Marshak, *Khimichni i mineralni dobavky v beton*. Kharkiv: Koloryt, 2005.
- [6] A.V. Usharov-Marshak, A.V. Kabus, "Funktsionalno-kineticheskii analiz vliyaniya dobavok na tverdenie tsementov", *Neorganicheskie materialy*, Tom 52, no. 4, pp. 479-484, 2016.
- [7] Kh.S. Sobol, "Kontseptsiiia zastosuvannia modyfikovanykh kompozytsiinykh tsementiv u budivelnomu vyrobnystvvi", *Visnyk NULP: Teoriia i praktyka budivnystva*, no. 520, pp.179-182, 2004.
- [8] Kh.S. Sobol, T.Ie. Markiv, M.A. Sanytskyi, H.V. Kohuch, "Vplyv aktyvnykh mineralnykh dodatkov na vlastyvoli kompozytsiinykh tsementiv", *Visnyk NULP: Khimiia, tekhnolohiia rehovyn ta yikh zastosuvannia*, no. 488, pp. 274-278, 2003.
- [9] V.V. Tokarchuk, V.Iu. Sokoltsov, V.A. Sviderskyi, "Vplyv skladu mineralnykh dobavok na vlastyvoli tsementiv", *Tekhnologicheskii audit i rezervi proizvodstva*, no. 3(5), pp. 9-12, 2014.
- [10] Z. Giergiczny, J. Malolepszy, J. Szwabowski, J. Sliwinski, *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonow nowej generacji*. Gorazdze cement. Opole, 2002.
- [11] Composite cements modified by chemical admixtures. *Proc. International conference*. Kosice (Slovakia), 2005. pp. 102-107.

- [12] R.F. Runova, Yu.L. Nosovskyi, *Tekhnolohiia modyfikovanykh budivelnykh rozchyniv*. Kyiv: KNUBA, 2007.
- [13] T. Kropyvnytska, M. Sanytsky, J. Geviuk, "Properties of Portland-composite cements with zeolite tuff", *Journal of Civil Engineering Environment and Architecture, JCEEA*, T.XXXV, no. 65(3/18), pp. 25-34, 2018.
- [14] V.V. Troian, *Dobavky dlia betoniv i budivelnykh rozchyniv*. Kyiv: Aspekt-Polihraf, 2010.
- [15] I.V. Barabash, *Mekhanokhimichna aktyvatsiia mineralnykh viazhuchykh rehovyn*. Odesa: Astroprint, 2002.
- [16] I.V. Barabash, I.M. Babii, K.O. Streltsov, "Intensive separate technology and its influence on the properties of cement-water compositions, solutions and concretes on their basis", *Modern construction and architecture*, Issue no. 2, pp. 44-51, 2022.
- [17] G. Khainike, *Tribokhimiya*. Moskva: Mir, 1987.
- [16] D.O. Pirohov, I.V. Barabash, "Vplyv rezhymu aktyvatsii na vlastyvoli tseментu, tseментного тiста та kameniu na yoho osnovi", *Zbirnyk tez mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Strukturoutvorennia ta ruinuvannia kompozytsiinykh budivelnykh materialiv ta konstruksii"*, Odesa: ODABA. 2023, pp.109-110.

ACTIVATION OF CEMENT AND ITS INFLUENCE ON STRUCTURE FORMATION OF CEMENT-CONTAINING COMPOSITIONS

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

¹**Pirogov D.O.**, graduate student, pirogovdima45@gmail.com, ORCID: 0009-0003-4096-3186
¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
4, Didrikhson str., Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. The article discusses issues related to the mechanochemical activation of the cement binder in a specially designed rotary counterflow mill. The given brief description of the design of a counterflow mill gives a general idea of the principle of its operation as an activator of the surface zone of a mineral binder. Typically, a positive characteristic of mineral binders is their rapid increase in strength. Therefore, scientific research related to the development of technology aimed at intensifying the processes of structure formation of cement paste and stone based on it is relevant. The use of this technology makes it possible to significantly increase the specific surface area of cement during its activation, reduce the setting time, increase the amount of chemically bound water and intensify the exothermic heating of hardening cement stone. The presented experimental data made it possible to optimize the activation period of the binder, which ranged from 60 to 600 seconds. It has been established that the optimal time from the point of view of the energy intensity of the process is the activation period of the binder for 300 seconds. During this activation period, there is an increase in the specific surface area of cement by an average of 8...10%, acceleration of setting time by 50...60 minutes, an increase in the amount of chemically bound water at 28 days of age from 13 to 16.3%, an increase in the maximum temperature of exothermic heating cement stone from 53.8 to 64.0 °C. A further increase in the activation period (up to 600 seconds) has little effect on the change in the listed properties. The effect of mechanochemical activation is significantly reflected in the compressive strength of cement stone. It has been established that activation of cement for 300 seconds causes an increase in the compressive strength of cement stone from 48 to 57 MPa, that is, by almost 20%. The effect of mechanochemical activation of cement is enhanced by the introduction of quartz sand into its composition. It has been experimentally established that the activation of cement with the addition of 20% quartz sand increases the strength of the filled cement stone by almost 30% relative to the strength of the stone using unadded cement that is not subject to mechanical activation.

Keywords: cement, activation, exothermic heating, mechanically activated binder.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2023

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ КОМПОЗИТИВ
МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ КАТАСТРОФ**

¹**Колесников А.В.**, к.т.н., доцент,
kolesnikov_himek@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8737-0933

¹**Семенова С.В.**, к.т.н., доцент,
semenova@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5309-5854

¹**Маковецька О.О.**, старший викладач,
makoveckaya_himek@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3135-4333

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

Анотація. У роботі досліджується можливість моделювання процесів структуроутворення у в'язучих матеріалах за допомогою деяких методів теорії катастроф. Аналізуються події на масштабному рівні співіснування і взаємодії макроскопічних і мікроскопічних явищ. Динаміка перетворень на цьому рівні організації матеріалу розглядається за допомогою методу структурного потенціалу, аналогічного термодинамічному, з можливістю його емпіричної ідентифікації на основі обробки мікроскопічних зображень. Перехід до потенціальних функцій теорії катастроф здійснюється шляхом геометричної параметризації – виділення ділянок об'єму, займаного фазами матеріалу та ділянок, пов'язаних із межами розділу. Модель структуроутворення представляється як явище в стохастичних градієнтних системах, зумовлене виникненням особливостей структурного потенціалу та їхньої трансформації при зміні керуючих фізико-хімічних параметрів. Показано можливість адаптації апарату фазових діаграм трикомпонентних систем до розглянутих завдань та його спорідненість із моделями теорії катастроф. Структурно-фазова діаграма будується за аналогією до методу Гіббса-Розебуму на трикутнику, координатами при цьому є частини компонентів з різною геометричною структурою – порожнинами, суцільним при обумовленому масштабі матеріалом і границями розділу з оточуючим трансформованим матеріалом. З потенціальних функцій теорії катастроф обґрунтовано виділені такі, що відповідають проаналізованій системі – омбілічні функції, а при спрощеному варіанті – потенціали однієї змінної. Розроблено схему дослідження матеріалів за допомогою методів структурних потенціалів, що базується на визначенні мезоскопічних масштабів для матеріалу, який вивчається, переході до частотних характеристик зображення, далі – до структурного потенціалу, що визначає асортимент структур, які реалізуються у матеріалі і, у перспективі, до переходу від структурних потенціалів до фізичних властивостей.

Ключові слова: структуроутворення, структурний потенціал, теорія катастроф, омбіліка, діаграма.

Вступ. Однією з центральних проблем будівельного матеріалознавства є управління технологічними властивостями матеріалів за допомогою спрямованого підбору рецептурно-технологічних факторів. Зв'язок між рецептурно-технологічними факторами та фізичними властивостями композиційного матеріалу здійснюється через структуру матеріалу, що виникає та змінюється в процесі структуроутворення. Однак відслідкувати відповідний причинно-наслідковий ланцюг доволі складно завдяки впливу структур, що формуються на різних просторових масштабах і, особливо, завдяки виникненню дуже широкого асортименту структур на кожному масштабному рівні. Один з перспективних напрямків подолання відповідних труднощів полягає в енергетичному підході, при якому властивості матеріалу визначаються за допомогою структурних потенціалів. При цьому можливий випадок, коли дуже різноманітні елементи структури матеріалу можуть відповідати майже

однаковому рівню структурного потенціалу. Перетворення структурного потенціалу завдяки зміні керуючих параметрів, одні з яких залежать безпосередньо від рецептурно-технологічних факторів, а інші можуть повільно змінюватися у часі протягом активної фази структуроутворення, можна дослідити методами теорії катастроф, чому і присвячена дана робота.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Одними з важливіших процесів, що відбуваються у в'язучих матеріалах різної природи, є тужавлення та твердіння, пов'язане з переходом в'язучих матеріалів та композитів на їх основі у каменеподібний стан. Зміна структурно-механічних властивостей матеріалів у процесі твердіння відбувається одночасно з явищами структуроутворення. Основна частина таких процесів обумовлена трансформацією багатомасштабної просторової структури матеріалу, що відбувається під впливом процесів на молекулярному рівні організації (наприклад, процесів гідратації та полімеризації). Незважаючи на те, що процеси структуроутворення стосуються всіх масштабних рівнів від молекулярного до макроскопічного, на якому проявляються експлуатаційні властивості матеріалу у зразку, виробі або конструкції, найбільший вплив на експлуатаційні властивості має проміжний, мезоскопічний структурний рівень [1] (300 нм – 0,1 мм). Трансформація матеріалу на цьому рівні представляється такою, що відбувається під впливом попереднього (молекулярного або мікрорівня) і пов'язана з виникненням високих потенційних бар'єрів (істотно вище рівня термічних флуктуацій), що відокремлюють одну групу (кластер, ансамбль [2, 3]) взаємодіючих частинок від іншої. Це явище зумовлює перехід матеріалу як цілого в каменеподібне тіло. Споріднені фізичні уявлення свідчать про збільшення структурної в'язкості матеріалу в цьому випадку.

Взаємодія частинок композиційного матеріалу на молекулярному і колоїдному рівні в присутності розчинника або інших частинок дисперсійного середовища, так само як і взаємодія частинок наповнювача в матричному матеріалі, підпорядковується досить складним закономірностям, а відповідні ефективні потенціали є сумою багатьох складових. Навіть у простому варіанті, що розглядається в теорії ДЛФО [4, 5], таких складових, що містять набір параметрів, вже дві, відповідно до вкладів електростатичної та дисперсійної взаємодії. Тому інтерес представляє таке моделювання структури матеріалів і процесів структуроутворення, що дозволить звести істотне розмаїття структурних елементів (тріщин, пір, капілярів) до кількох геометричних параметрів, тобто використати метод параметризації.

Метою роботи є аналіз методу структурного потенціалу і можливості його застосування при дослідженні процесів структуроутворення. Відповідними завданнями є адаптація методу фазових діаграм трикомпонентних систем до мезоструктурних змін у матеріалі та обґрунтований вибір потенціалів теорії катастроф, які відповідають задачі аналізу структури матеріалу.

Методика дослідження полягає в моделюванні структурних перетворень в композиційному матеріалі за допомогою градієнтних стохастичних систем та відповідних рівнянь Ланжевена та Фокера-Планка, дослідженні стаціонарних рішень та їх структурно-орієнтованому тлумаченні.

Результати досліджень. Методи структурно-орієнтованого дослідження композиційних матеріалів можуть бути засновані на різних підходах. Один з них базується на виділенні окремих конкретних об'єктів, що впливають на важливі властивості матеріалу. Наприклад, в багатьох випадках слід у першу чергу виділити внутрішні границі розділу, пори та мікротріщини, що присутні в досліджуваному матеріалі. Але різноманітність потенційно активних об'єктів, розвиток яких обумовлює процеси при структуроутворенні та руйнуванні, досить висока [6]. Наприклад, в теплоізолюючих композиційних матеріалах часто виявляються області накопичення інертних частинок заповнювачів – таких елементів структури, що не забезпечують міцність. Фактор різноманітності структурних елементів композиційних матеріалів примушує застосувати методи параметризації, згідно з яким усі структурні елементи розглядаються принципово однаково – для них визначається відображення на простір деякого невеликого набору параметрів – геометричних,

топологічних або енергетичних, і дослідження таких параметрів. При цьому структурам різного типу відповідають різні координати простору параметрів.

Найбільш очевидним і природним методом параметризації є геометрична параметризація. Проводиться розбиття досліджуваної ділянки зразка за допомогою сітки калібру, $\delta_i, i = 1, \dots, M$, що зменшується, і далі обчислюється об'ємна частка, зайнята клітинами, що містять тривимірні (об'ємні, при заданому масштабі) ділянки матеріалу η_v , об'ємна частка, зайнята двовимірними поверхнями розділу η_s , і об'ємна частка вільних осередків $\eta_f(1)$:

$$\eta_v = \frac{N_v}{N}, \quad \eta_s = \frac{N_s}{N}, \quad \eta_f = \frac{N_f}{N}, \quad (1)$$

тут $N = N_v + N_s + N_f$ – сумарна кількість осередків і, відповідно (2):

$$\eta_v + \eta_s + \eta_f = 1. \quad (2)$$

Аналогічну параметризацію можна реалізувати і для композиційного матеріалу, при цьому необхідно враховувати існування системи з декількох фаз (наприклад, «матриця-наповнювач») і кілька видів меж розділу.

Процес структурування для прийнятої параметризації можна розглядати наступним чином. Нехай матеріал може бути розбитий за допомогою сітки на мезоструктурні осередки (велике розбиття, калібр сітки $\varepsilon \gg \delta_1$), у кожній з яких обчислюються показники (1).

Структурні характеристики кожної великомасштабної комірки можна зобразити, наприклад, за допомогою адаптованого графічного апарату трикомпонентних фізико-хімічних систем. Фізико-геометричний стан матеріалу у великій комірці (а іноді, якщо цього достатньо для структурно-орієнтованого дослідження, і для всього матеріалу) відображається на відповідному трикутнику Гіббса-Розебума [7] (рис.1).

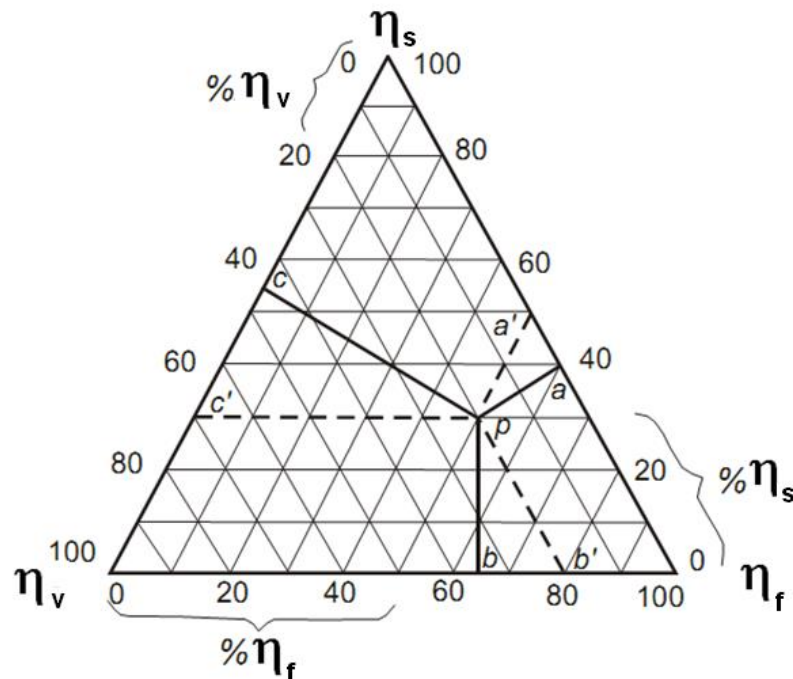


Рис. 1. Застосування графічних методів теорії трикомпонентних фізико-хімічних систем до відображення фізико-геометричних характеристик матеріалу: η_v – об'ємна частина тривимірного матеріалу; η_s – об'ємна частина комірок, що зайняті двовимірними структурами; η_f – об'ємна частина комірки, що зайнята вільним об'ємом або матеріалом у розчиненій формі; точка P відповідає фізико-геометричному стану матеріалу; сплошні лінії відповідають методу Гіббсу, пунктирні – методу Розебума

Процеси в осередках припускаємо незалежними, що утворюють статистичну сукупність. Тоді на підставі вимірювань можна відновити емпіричну щільність розподілу (3):

$$f(\eta_v, \eta_s, \eta_f), \int f d\eta = 1, \quad (3)$$

та обчислити ефективний потенціал [8, 9] (4):

$$H(\eta, q) = -\ln f(\eta, q), \quad (4)$$

тут $\eta = [\eta_v, \eta_s, \eta_f]$; q – вектор параметрів управління, відповідний впливам як з нижчого мікроскопічного рівня, так і з макrorівня (приклад – навантажений матеріал у формі виробу).

Процесу структуроутворення в композиційних матеріалах з позицій, що пропонуються, можна зіставити часову еволюцію керованої системи Ланжевена [9] (5):

$$\frac{d\eta_i}{dt} = -\frac{\partial H(\eta, q)}{\partial \eta_i} + F_i. \quad (5)$$

Тут (5) визначає релаксаційний процес під час дії флуктуацій F_i з інших масштабних рівнів – мікро- і макроскопічного.

Характерно те, що управління q може змінюватися в часі і представляти відому функцію $q(t)$, що описує структурно-хімічні процеси. Система (5), загалом кажучи, має бути доповнена співвідношеннями для кінетики фізико-хімічних процесів, що супроводжують структуроутворення. Далі буде передбачатися, що процеси релаксації (5) переважають, а рівняння Фоккер-Планка (6), відповідне (5), описує досягнення стаціонарного розподілу ймовірності f_{cm} [10]:

$$\frac{\partial f(\eta, q)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \eta_i} (A_i(\eta, q) f(\eta, q)) + D \frac{\partial^2 f(\eta, q)}{\partial \eta_i^2}, \quad (6)$$

тут виконується (7):

$$A_i(\eta, q) = -\frac{\partial H(\eta, q)}{\partial \eta_i} = -D \frac{\partial (\ln f(\eta, q))}{\partial \eta_i}. \quad (7)$$

При зроблених припущеннях відновлена функція розподілу (3) відповідає стаціонарному розподілу як стаціонарному рішення (6) за умови градієнтності (7). Функція розподілу $f(\eta, q)$ задає потенціал $H(\eta, q)$ із точністю до постійного множника.

До вивчення властивостей потенціалу $H(\eta, q)$, визначити який з фізичних міркувань для даного випадку доволі важко. Можна застосувати методи апроксимації до функцій катастроф. Варіанти такого застосування суттєво залежать від змістовної суті завдань матеріалознавства, а саме від кількості ступенів свободи системи.

У разі найбільш поширеної описаної вище задачі («матеріал – межа розділу – пустотна фаза») як апроксимуючий потенціал теорії катастроф, керуючись геометричним змістом запропонованого опису (2) за допомогою змінних η_s, η_v (третя виключається за допомогою (2)), переходимо до катастроф із двома змінними – омбілічними потенціалами теорії катастроф (табл. 1). Для цього також можливо попередньо застосувати лінійні перетворення координат або перетворення (8):

$$x = \frac{\eta_s}{\eta_v} \quad y = \frac{\eta_f}{\eta_v}, \quad (8)$$

При цьому слід враховувати рівність (9):

$$H(\eta, q) = C(x, y, q). \quad (9)$$

Таблиця 1 – Потенціали омбілічних катастроф

Тип катастрофи	Формула
Гіперболічна омбіліка	$C(a, b, c) = x^3 + y^3 + axy + bx + cy$
Еліптична омбіліка	$C(a, b, c) = \frac{x^3}{3} - xy^2 + a(x^2 + y^2) + bx + cy$
Параболічна омбіліка	$C(a, b, c, d) = yx^2 + y^4 + ax^2 + by^2 + cx + dy$

Зображення відповідних омбілічних поверхонь наведено на рис. 2, 3 [11, 12].

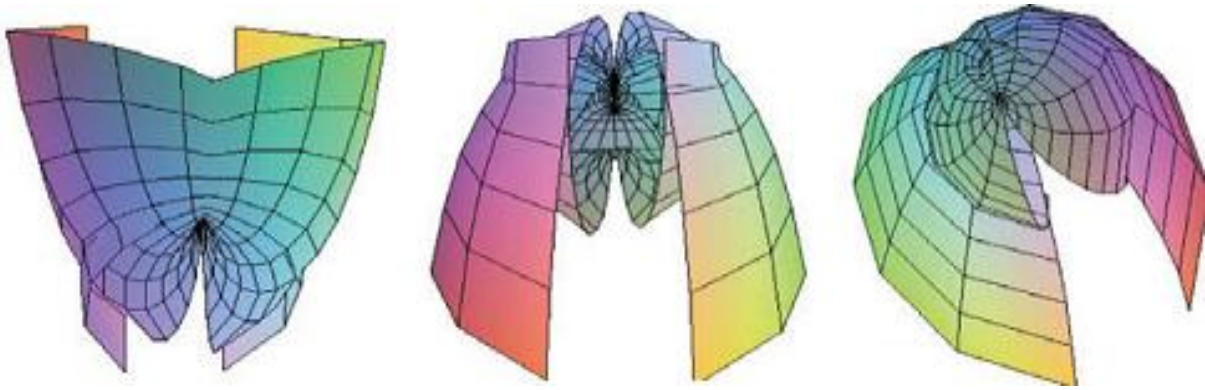


Рис. 2. Поверхня параболічної омбіліки

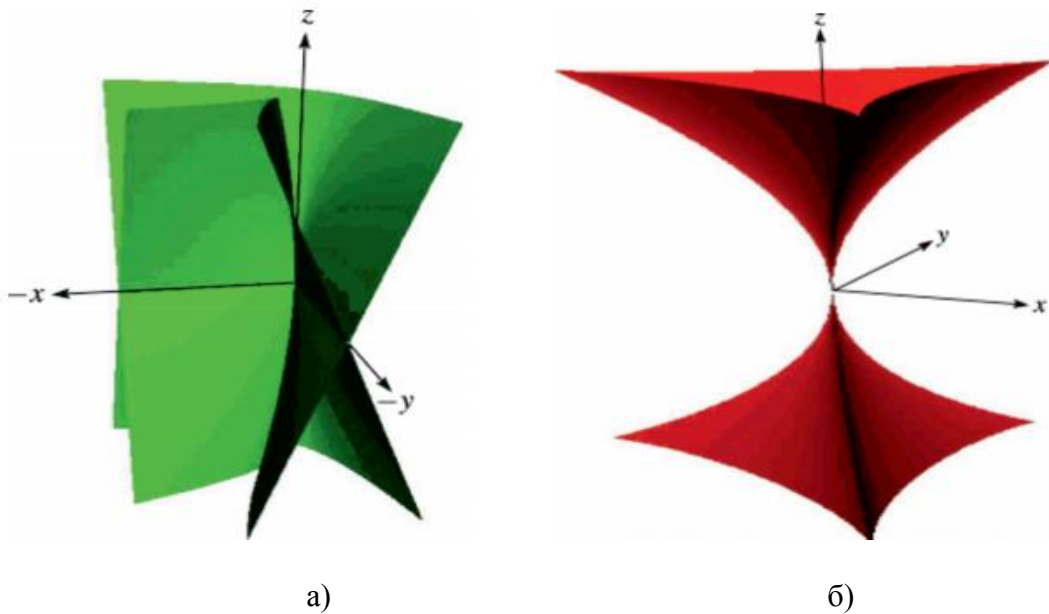


Рис. 3. Гіперболічна (а) та еліптична (б) омбіліка

Інтерес представляє питання, чи можна побудувати ефективну модель структурної трансформації матеріалу (принаймні деяких її видів) за допомогою більш простих функцій теорії катастроф, що містять тільки одну змінну і ряд керуючих параметрів. Одним із шляхів такого моделювання є припущення про те, що пропорція між елементами об'єму, що займає поверхня розділу фаз, і вільним об'ємом зберігаються постійними (10):

$$\eta_f \approx k\eta_s. \quad (10)$$

Таке співвідношення геометричних параметрів є грубою моделлю тріщини з однорідним розкриттям k . Якщо прийняти таку огрублену модель тріщини і відобразити процеси тріщиноутворення на структурному трикутнику Гіббса-Розебума, то ефект тріщиноутворення може бути описаний як переміщення вздовж відрізка, що виходить з вершини $\eta_v = 1$ («суцільний» при аналізованому масштабному рівні матеріал), або з будь-якої іншої внутрішньої точки трикутника для матеріалу зі складною структурою і наявними структурними елементами (рис. 4).

Так як у цьому випадку система стає формально моноваріантною, єдиною змінною залишається $\Delta\eta_v = \eta_{v1} - \eta_{v2}$, пов'язаною з тріщиноутворенням, при поширенні тріщини η_v зменшується.

Перейдемо до нормованого показника (11):

$$x = 1 - \frac{\Delta\eta_v}{\Delta\eta_{v \max}}, \quad (11)$$

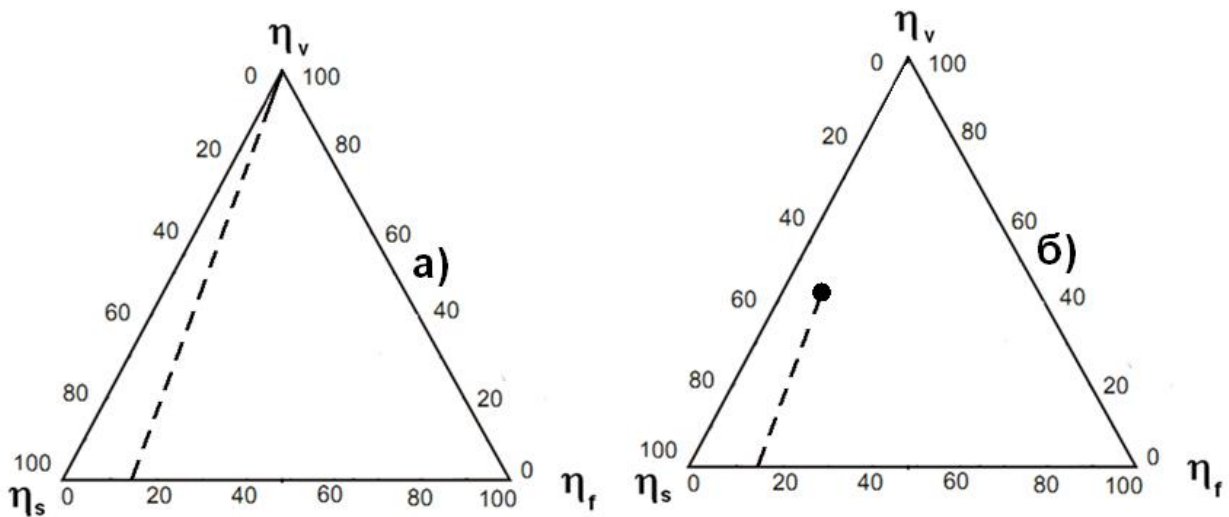


Рис. 4. Лінії постійних співвідношень (10) в трикутнику Гіббса-Розебуму (пунктир)

Його можна використовувати для побудови потенціалів $C(x)$ [13, 14] (див.(9)) (табл. 2). Статистична реконструкція дозволяє це здійснити через функцію розподілу (3).

Таблиця 2 – Потенціали теорії катастроф як апроксимуючі моделі керованого тріщиноутворення

Тип катастрофи	Формула
Складка	$C(x, a) = \frac{1}{3}x^3 + ax$
Збірка	$C(x, a, b) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx$
«Хвіст ластівки»	$C(x, a, b, c) = \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{3}ax^3 + \frac{1}{2}bx^2 + cx$
«Метелик»	$C(a, b, c, d) = x^6 + ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx$

У всіх цих випадках параметрами управління можуть бути як рецептурно-технологічні фактори композиту, так і характер навантаження матеріалу в конструкції і зразку при випробуванні. Розглянемо, наприклад, найпростішу катастрофу збірки (рис. 5). Тут відображається не потенціал H або C , а його похідна A (7).

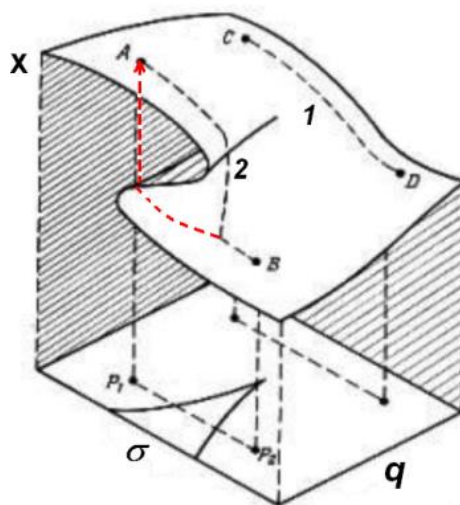


Рис. 5. Якісна інтерпретація процесів об'ємного руйнування матеріалу за допомогою теорії катастроф

Необоротне зростання об'єму, зайнятого тріщиною з її береговими поверхнями, моделюється гістерезисом (рис. 5, 2) і стрибкоподібним спаданням X . Якщо крива перерізу складання присікає вісь ординат (тут X), гістерезисні зміни трансформуються в незворотні (модель класичного руйнування). Залежно від властивостей матеріалу процес кінцевої деформації в деякому діапазоні є оборотним (рис. 5, 1), відповідним, наприклад, оборотним змінам структури при пружних деформаціях. Поява нових параметрів управління при переході до більш складних катастроф («ластівчин хвіст», «метелик», рис. 4) призводить до збільшення різноманіття динамічних режимів досліджуваного матеріалу за різних видів керуючих впливів.

Потенціали як із двома, і однієї змінної, що найчастіше реалізуються, відновлюються шляхом статистичної реконструкції. Об'єднання методів геометричної параметризації (1, 2), статистичної реконструкції (3-7), методів теорії катастроф та структурно-геометричних діаграм Гіббса-Розебуму дозволяє запропонувати єдиний алгоритм дослідження структури матеріалу та процесів структуроутворення (рис. 6).

Відповідно до цього алгоритму здійснюється аналіз частотних характеристик матеріалу, здійснюється перехід до структурних потенціалів, які є основою для прогнозу та управління експлуатаційними властивостями композиційних будівельних матеріалів.

Слід зазначити, що запропонована схема, що базується на структурних потенціалах у вигляді потенціалів та систем теорії катастроф, є пристосованою для вивчення процесів структуроутворення в композиційних матеріалах. Експериментальною основою тут можуть бути серії «миттєвих» знімків структури матеріалу, що формується, параметри потенціалів розглядаються при цьому як функції часу активної фази структуроутворення, наприклад, тужавління. Такий вважається перспективним для експериментально-статистичного моделювання процесів структуроутворення матеріалів.

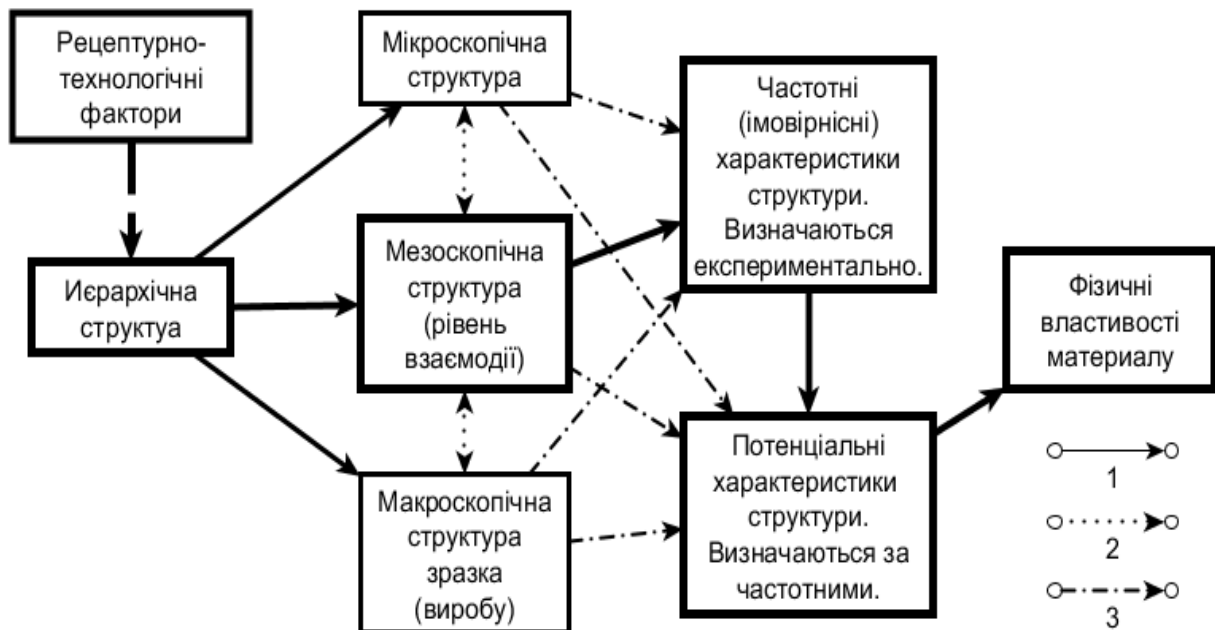


Рис. 6. Алгоритм структурно-орієнтованого дослідження структури матеріалів та процесів структуроутворення: 1 – переходи між етапами, 2 – відповідності, 3 – приховані впливи; пропонувані маршрути дослідження затемнені

Висновки. Розглянуті особливості застосування методів теорії катастроф при дослідженні проблем структуроутворення у *матеріалах*. Визначені потенціали теорії катастроф, що відповідають формам структурного потенціалу. Події, що відбуваються під час структуроутворення, моделюються змінами параметрів структурних потенціалів. Розроблений алгоритм послідовного переходу від зображень поверхонь матеріалу на мезоскопічному масштабі до частотних характеристик структури зображень і далі, до структурного потенціалу і фізичних властивостей композиту. Підхід, який запропоновано, є

перспективним до експериментально-статистичного моделювання процесу багато осередкового структуроутворення.

Література

1. Выровой В.Н., Суханов В.Г., Коробко О.А. Структура материала в структуре конструкции Одесса: Полиграф, 2016. 244 с.
2. Выровой, В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства. Одесса: «ТЭС», 2010. 169 с.
3. Выровой В.Н., А. Н. Гергега, 2012. Ансамбль перколяційних кластерів фаз як основа само подібної структури композитів. *Сучасні будівельні матеріали*. 2012. №1(93). С. 53-57.
4. Довгань, И.В., Колесников, А.В., Семенова, С.В. Методы описания процессов коагуляции и структурообразования в строительных вяжущих материалах. *Вісник ОДАБА*. 2010. №38. С. 224-230.
5. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии: учебник. Санкт-Петербург: Лань, 2010. 416 с.
6. Выровой В.Н., Суханов В.Г., Елькин А.В., Казмирчук Н.В. Самоорганизация. Структура. Свойства. *Моделювання та оптимізація будівельних композитів*: матеріали міжнародного семінару, 3-4 грудня 2020 р. Одеса: ОДАБА, 2020. С. 23-26
7. Еремин В.В., Каргов С.И., Успенская И.А. Основы физической химии: теория и задачи. М.: Экзамен, 2005. 480 с.
8. Breden J., Hubler A. Reconstruction Equation of Motion From Experimental Data with Unobserved Variables, *Phis. Rev. A*. 1990. № 42(10). P. 5817-5826.
9. Klimontovich Yu.L. Entropy evolution in self-organization processes. H-theorem and S-theorem. *Physica*. 1987. V.142A, No. 1-3. P. 390-404.
10. Эбелинг В., Энгель-Герберт Г. Экстремальные принципы и теория катастроф для стохастических моделей нелинейных необратимых процессов. Термодинамика и кинетика биологических процессов. М.: Наука, 1980. С. 153–169.
11. Tom, R. Structural stability, catastrophe theory, and applied mathematics. *SIAM Review*. 1977. № 19(2). P.189–201.
12. Zeeman, E. C. Catastrophe theory. *Scientific American*. 1976 234(4), 65–83.
13. Бородин А.И., Шаш Н.Н., Новикова Н.Н. Применение синергетических методов и теории катастроф. *Эффективное антикризисное управление*. 2015, 2. С. 84-90.
14. Liu, J., Bao, J., Yin, Y., Yang, S. Applications of Catastrophe Theory in Engineering: A Review. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. 2015. №12(12). P. 5739–5744.

Reference

- [1] V.N. Vyrovoy, V.G. Sukhanov, O.A. Korobko, *Struktura materiala v strukture konstruksii*. Odessa: Poligraf, 2016
- [2] V.N. Vyrovoy, V.S. Dorofeev, V.G. Sukhanov, *Kompozitsionnyye stroitelnyye materialy i konstruksii. Struktura, samoorganizatsiya, svoystva*. Odessa: TES, 2017.
- [3] V.N. Vyrovoy, A.N. Gerega, "Ansambl perkolyatsiynikh klasteriv faz yak osnova samo podibnoi struktury kompozytiv", *Suchasni budivelni materialy*, vol. 1(93), pp. 53-57, 2012.
- [4] I.V. Dovgan, A.V. Kolesnikov, S.V. Semenova, "Metody opisaniya protsessov koagulyatsii i strukturoobrazovaniya v stroitelnykh vyazhushchikh materialakh", *Vіsnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, vol. 38, pp. 224-230, 2010.
- [5] D.A. Fridrikhsberg, *Kurs kolloidnoy khimii: uchebnik*. Sankt-Peterburg: Lan, 2010.
- [6] V.N. Vyrovoy, V.G. Sukhanov, A.V. Yelkin, N.V. Kazmirchuk, "Samoorganizatsiya. Struktura. Svoystva", *Modelyuvannya ta optyimizatsiya budivelnykh kompozytiv: materialy mizhnarodnoho seminaru*. Odesa, 2020, pp. 23-26.
- [7] V.V. Yeremin, S.I. Kargov, I.A. Uspenskaya, *Osnovy fizicheskoy khimii: Teoriya i zadachi*. M.: Ekzamen, 2005.

- [8] J.L. Breden, A. Hubler, "Reconstructing equation of motion from experimental data with unobserved variables", *Physical Review A*, vol. 42(10), pp. 5817-5826, 1990.
- [9] Yu.L. Klimontovich, "Entropy evolution in self-organization processes. H-theorem and S-theorem", *Physica*, vol.142 (1-3), pp. 390-404, 1987.
- [10] V. Ebeling, G. Engel-Gerbert, *Ekstremalnyye printsipy i teoriya katastrof dlya stokhasticheskikh modeley nelineynykh neobratimyykh protsessov. Termodinamika i kinetika biologicheskikh protsessov*. M.: Nauka, 1980. pp. 153–169.
- [11] R. Tom, "Structural stability, catastrophe theory, and applied mathematics", *SIAM Review*, vol. 19(2), pp.189–201, 1977.
- [12] E.C. Zeeman, "Catastrophe theory", *Scientific American*, vol. 234(4), pp. 65–83, 1976.
- [13] A.I. Borodin, N.N. Shash, N.N. Novikova, "Primeneniye sinergeticheskikh metodov i teorii katastrof", *Effektivnoye antikrizisnoye upravleniye*, vol. 2(89). pp. 84-90, 2015.
- [14] J. Liu, J. Bao, Y. Yin & S. Yang, "Applications of Catastrophe Theory in Engineering: A Review", *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 12(12), pp. 5739–5744, 2015.

SIMULATION OF COMPOSITES STRUCTURE FORMATION PROCESSES USING THE METHODS OF THE CATASTROPHE THEORY

¹**Kolesnykov A.V.**, Ph.D., Associate Professor,
kolesnikov_himek@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8737-0933

¹**Semenova S.V.**, Ph.D., Associate Professor,
semenova@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5309-5854

¹**Makovetska O.O.**, Senior Lecturer,
makoveckaya_himek@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3135-4333

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

Abstract. The paper examines the possibility to model the structure formation processes in binder materials using some methods of catastrophe theory. Events at the level of coexistence and interaction of macroscopic and microscopic phenomena are analyzed. The dynamics of transformations at this level of material organization is considered using the method of structural potential, similar to the thermodynamic one, with the possibility of its empirical identification based on the processing of microscopic images. The transition to the potential functions of the theory of catastrophes is carried out by means of geometric parameterization – selection of areas of the volume occupied by material phases and areas associated with interface boundaries. The model of structure formation is presented as a phenomenon in stochastic gradient systems caused by the emergence of features of the structural potential and their transformation upon changing the controlling physicochemical parameters. The possibility of adapting the apparatus of phase diagrams of three-component systems to the considered tasks and its affinity with catastrophe theory models is shown. The structural-phase diagram is constructed by analogy to the Gibbs-Roseboom method on a triangle, while the coordinates are parts of components with different geometric structures – cavities, continuous material at a given scale and interfaces with the surrounding transformed material. From the potential functions of the theory of catastrophes, those that correspond to the analyzed system are reasonably selected - umbilical functions, and in the simplified version – potentials of one variable. A scheme for the study of materials using methods of structural potentials has been developed, which is based on the determination of mesoscopic scales for the material being studied, on the transition to the frequency characteristics of the image, then to the structural potential, which determines the range of structures realized in the material and, in the future, to the transition from structural potentials to physical properties.

Keywords: structure formation, structural potential, catastrophe theory, umbilical surfaces, diagram.

Стаття надійшла до редакції 9.11.2023

**ВПЛИВ БАЗАЛЬНОЇ ФІБРИ І СУПЕРПЛАСТИФІКАТОРУ
НА МІЦНІСТЬ БЕТОНІВ ЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ**

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

¹**Шестакова Л.Є.**,
shestakova_luba@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3449-8498

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

Анотація. За 15-ти точковим симетричним планом проведено експеримент, в якому варіювалися наступні фактори складу фібробетонів жорсткого дорожнього покриття: кількість портландцементу (від 290 до 350 кг/м³), кількість базальтової фібри BAUCON®-bazalt з довжиною волокон 12 мм і діаметром 18 мкм (від 0,9 до 1,5 кг/м³), кількість суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G (від 0,6 до 1% від маси цементу). Всі суміші мали рівну рухомість з ОК=2..3 см, що досяглося підбором кількості води з відповідним корегуванням складу фібробетону.

Встановлено, що при збільшенні кількості портландцементу В/Ц бетонної суміші рівної рухомості очікувано знижується. За рахунок підвищення кількості суперпластифікатору до 0,9-1,0% від маси цементу В/Ц суміші знижується, а при підвищенні кількості базальтової фібри від 0,9 до 1,5 кг/м³ В/Ц практично не змінюється.

Визначалася міцність фібробетонів на стиск і на розтяг при згині у віці 3 і 28 діб. Встановлено, що загальний характер впливу варійованих факторів на міцність у ранньому і проектному віці є аналогічним. У віці 3 діб міцність на стиск досліджених фібробетонів становить 65-68% від рівня їх міцності у 28 денному віці, міцність на розтяг при згині становить 73-75% від 28 денної міцності.

За рахунок підвищення кількості портландцементу у складі міцність фібробетонів очікувано зростає, при цьому більш відчутно у проектному віці. При підвищенні кількості базальтової фібри з 0,9 до 1,5 кг/м³ міцність на стиск зростає несуттєво. Підвищення дозування суперпластифікатору з 0,6 до 0,9-1% викликає зниження В/Ц, за рахунок чого міцність на стиск фібробетонів зростає у віці 3 діб на 2,3-2,6 МПа, у віці 28 діб – на 3,2-3,8 МПа.

На рівень міцності на розтяг при згині найбільш суттєво впливає кількість цементу у складі. За рахунок збільшення кількості базальтової фібри з 0,9 до 1,3-1,4 кг/м³ міцність на розтяг при згині фібробетонів у віці 3 діб зростає на 0,5-0,6 МПа, у віці 28 діб – на 0,7-0,8 МПа. Зміна кількості суперпластифікатору в межах факторного простору експерименту несуттєво впливає на міцність фібробетонів на розтяг.

Таким чином в досліджених фібробетонах раціональною кількістю базальтової фібри BAUCON®-bazalt можна визнати 1,3 кг/м³, раціональною кількістю суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G – 0,9% від маси цементу.

Завдяки застосуванню раціональної кількості базальтової дисперсної арматури і суперпластифікатору отримано фібробетони з міцністю на стиск від 40 до 55 МПа та з міцністю на розтяг при згині від 4,5 до 6 МПа в залежності від кількості цементу у складі.

Ключові слова: жорстке дорожнє покриття, базальтова фібра, суперпластифікатор, міцність, планований експеримент.

Вступ. Жорсткі цементобетонні дорожні покриття мають низку переваг перед асфальтобетонними покриттями. Найбільш суттєвими з цих переваг можна вважати високу довговічність покриттів та стійкість до утворення колії та інших хвилеподібних деформацій.

За рахунок меншого прогину дорожнього полотна транспорт знижує витрату палива, що корисно з економічної та екологічної точок зору. При цьому собівартість будівництва доріг з цементобетону в останні роки майже зрівнялася з собівартістю будівництва доріг з асфальтобетонним покриттям. Це зумовлює все більш широке використання жорстких дорожніх покриттів у багатьох країнах світу, включаючи Україну.

Проте з врахуванням постійного розвитку індустрії будівельних матеріалів не можна вважати повністю вирішеною задачу розробки ефективних бетонів для влаштування дорожніх покриттів. Зокрема актуальними залишаються дослідження, спрямовані на вдосконалення складів фібробетонів з різними типами дисперсної арматури. Спричинені бойовими діями в нашій країні чисельні руйнування дорожньої інфраструктури роблять задачу розробки ефективних фібробетонів дорожніх покриттів ще актуальнішою. З врахуванням економічних перспектив післявоєнного відновлення при розробці складів фібробетонів важливо спиратися на максимальне використання вітчизняних компонентів, включаючи модифікатори і дисперсну арматуру.

Аналіз досліджень і публікацій. Конструкції дорожніх покриттів експлуатуються у достатньо жорстких умовах при змінному напрямку дії навантаження від транспорту та одночасно піддаються динамічним впливам, дії заморожування та відтавання, стиранню [1, 2]. Матеріалом жорстких дорожніх покриттів є бетон, робота якого при напруженнях стиску та розтягування суттєво відрізняється. З врахуванням вище зазначених чинників застосування дисперсного армування можна вважати одним з найбільш ефективних методів покращення механічних властивостей і підвищення довговічності бетонів дорожніх покриттів [3-5].

Для дорожніх бетонів у якості дисперсної арматури використовуються волокна різних типів. Найбільш часто застосовують полімерну, базальтову і сталеву фібру [3-6], є певний досвід використання скляної фібри [3, 7]. Ефективність будь якого з типів дисперсного армування залежить від багатьох чинників, зокрема геометричних особливостей волокон та їх зчеплення з цементно-піщаною матрицею. Але можна відзначити певні переваги базальтового волокна, які є важливими саме для дорожнього будівництва. Такими перевагами є порівняно низька вартість, достатньо легкий розподіл волокон у суміші в процесі перемішування, а також висока корозійна стійкість [4, 8, 9].

Дисперсне армування базальтовою фіброю підвищує міцність, морозостійкість і тріщиностійкість бетонів дорожніх покриттів, знижує аутогенну усадку [4, 8-12]. Наприклад у [12] за рахунок використання базальтової фібри міцність на згин бетонів дорожніх покриттів зростала на 20%, міцність на стиск – на 9%. При цьому автори дослідження відмічали суттєвий вплив довжини волокон фібри. Аналогічні результати були отримані у [13], де найбільшу ефективність було відмічено при застосуванні базальтових волокон довжиною 36 мм у кількості 8 кг/м³. У [4] дисперсне армування базальтовою фіброю підвищувало міцність бетону на стиск на 5% і динамічний модуль пружності на 14%. Близькі результати отримано у роботі [14], в якій завдяки використанню фібри міцність бетону підвищувалася на 6-14%, модуль пружності на 7,6%.

Проте дисперсна арматура впливає на реологічні характеристики бетонних сумішей. Відповідно при її застосуванні як правило необхідно або збільшувати кількість води у складі, що не є бажаним, або компенсувати цей ефект зміною кількості пластифікатору [5, 14, 15].

Таким чином для кожного типу бетону дорожнього покриття необхідно визначити раціональну кількість фібри та пластифікатору в залежності від вимог до бетону та від особливостей його складу [16]. При цьому з врахуванням значних обсягів робіт, які необхідно виконати для відновлення зруйнованої під час воєнних дій дорожньої інфраструктури, важливо враховувати наявні на ринку вітчизняні цементи, заповнювачі та модифікатори.

Метою роботи є визначення впливу кількості базальтової фібри і суперпластифікатору полікарбоксилатного типу на міцність фібробетонів жорстких дорожніх покриттів у ранньому і проєктному віці.

Матеріали і методи досліджень. Для приготування фібробетонних сумішей використовували наступні матеріали:

– портландцемент ПЦ І-500Р-Н виробництва філії «Волинь-Цемент» ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна»;

– кварцовий пісок з модулем крупності 2,0, митий. Походження піску – Вознесенський район Миколаївської області;

– гранітний щебінь фракції 5-20 мм. Походження щебеню – Новобузький район Миколаївської області;

– добавка суперпластифікатор STACHEMENT 2570/5/G виробництва ТОВ «Стахема Львів-сервіс». Виробляється на основі полікарбоксилатів;

– базальтової фібри BAUCON®-bazalt з довжиною волокон 12 мм і діаметр 18 мкм; Виробник фібри – ТОВ «Баутех-Україна».

Дослідження проводилися з використанням методів планування експерименту за оптимальним 15-ти точковим симетричним 3-х факторним планом [17, 18]. Варіювалися наступні фактори складу фібробетонів:

– X_1 , кількість портландцементу, від 290 до 350 кг/м³;

– X_2 , кількість базальтової фібри, від 0,9 до 1,5 кг/м³;

– X_3 , кількість суперпластифікатору, від 0,6 до 1% від маси цементу.

План експерименту і склади досліджених фібробетонів наведені у таблиці 1. Перехід від натуральних до кодованих значень рівнів факторів виконано за типовою процедурою [17, 18].

Таблиця 1 – План експерименту і склади досліджених фібробетонів

№ точки	Рівні факторів			Склад фібробетону (кг/м ³)						В/Ц
	x_1 портландцемент	x_2 базальтова фібра	x_3 добавка STACHEMENT	Портландцемент	Щебінь	Пісок	Базальтова фібра	Добавка STACHEMENT 2570/5/G	Вода	
1	-1	-1	-1	290	1225	830	0,9	1,74	126	0,434
2	-1	-1	1	290	1225	837	0,9	2,90	122	0,421
3	-1	0	0	290	1225	833	1,2	2,32	125	0,431
4	-1	1	-1	290	1225	830	1,5	1,74	127	0,438
5	-1	1	1	290	1225	834	1,5	2,90	124	0,428
6	0	-1	0	320	1215	803	0,9	2,56	133	0,416
7	0	0	-1	320	1215	798	1,2	1,92	136	0,425
8	0	0	0	320	1215	801	1,2	2,56	134	0,419
9	0	0	1	320	1215	803	1,2	3,20	133	0,416
10	0	1	0	320	1215	801	1,5	2,56	134	0,419
11	1	-1	-1	350	1205	765	0,9	2,10	146	0,417
12	1	-1	1	350	1205	772	0,9	3,50	141	0,403
13	1	0	0	350	1205	770	1,2	2,80	143	0,409
14	1	1	-1	350	1205	763	1,5	2,10	147	0,420
15	1	1	1	350	1205	768	1,5	3,50	144	0,411

Такий діапазон варіювання факторів був прийнятий з врахуванням результатів першого етапу експериментальних досліджень, в якому були отримані фібробетони дорожніх покриттів з міцністю на стиск до 60 МПа і міцністю на розтяг понад 6 МПа [19]. На згаданому першому етапі були досліджені властивості бетонів при кількості

портландцементу 350 кг/м^3 та виявлено позитивний вплив дисперсного армування базальтовою фіброю. Описаний у даній роботі етап експериментальних досліджень розширює діапазон використання отриманих результатів для влаштування жорстких покриттів доріг різних категорій та виявляє вплив кількості суперпластифікатора і фібри на властивості бетонів з різною кількістю цементу.

Всі бетонні суміші мали рівну рухомість S_1 при $OK = 2..3 \text{ см}$, що досягалося підбором кількості води з відповідним корегуванням складу бетону. Така рухомість відповідає вимогам ДБН В.2.3-4:2015 при технології влаштування покриття з використанням бетоноукладача з ковзною опалубкою.

Результати досліджень. Як зазначено вище, суміші всіх досліджених бетонів і фібробетонів мали рівну рухомість. Відповідно їх В/Ц залежало від складу (таблиця 1). Експериментально-статистична (ЕС) модель [17], що описує вплив факторів складу на В/Ц має вигляд:

$$\begin{aligned} \text{В/Ц} = 0,418 - 0,009x_1 + 0,002x_1^2 & \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 \\ & + 0,003x_2 - 0,001x_2^2 + 0,001x_2x_3 \\ & - 0,006x_3 + 0,001x_3^2 \end{aligned} \quad (1)$$

За ЕС-моделлю (1) була побудована діаграма у формі куба, яка більш наочно відображає вплив варійованих факторів та яка показана на рис. 1.

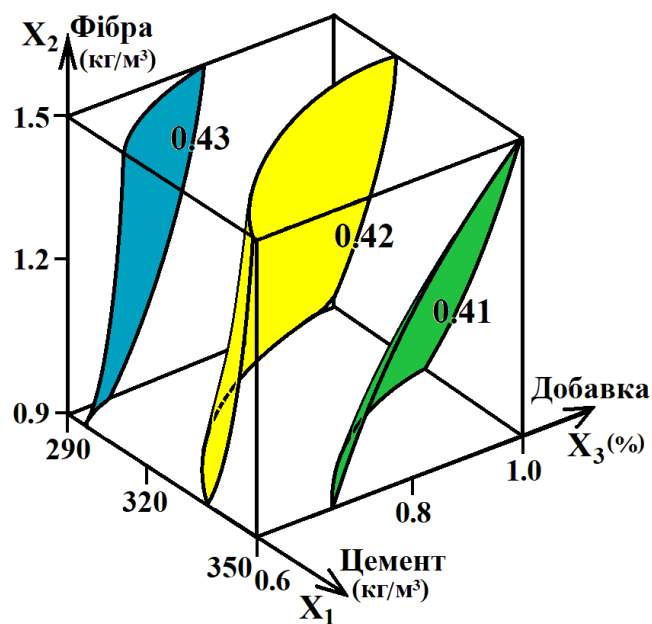


Рис. 1. Вплив варійованих факторів складу на В/Ц сумішей рівної рухомості

Як можна побачити на наведеній діаграмі, при збільшенні кількості портландцементу В/Ц бетонної суміші рівної рухомості очікувано знижується. За рахунок підвищення кількості суперпластифікатора з 0,6 до 1,0% від маси цементу В/Ц суміші знижується, проте не істотно – в середньому на 3%. Це пояснюється тим, що вже при дозуванні у 0,6% добавка STACHEMENT 2570/5/G є досить ефективною [19]. При цьому зростання кількості суперпластифікатора з 0,9 до 1% не знижує В/Ц суміші. Тобто раціональною кількістю добавки є 0,8-0,9% від маси цементу. При підвищенні кількості базальтової фібри від 0,9 до $1,5 \text{ кг/м}^3$ В/Ц суміші рівної рухомості практично не змінюється. Навіть застосування максимальної кількості фібри вимагає підвищення В/Ц суміші в межах 1,5%.

Для всіх досліджених фібробетонів згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 визначалася їх міцність на стиск і на розтяг при згині у віці 3 і 28 діб (Таблиця 2).

Таблиця 2 – Міцність досліджених фібробетонів на стиск і на розтяг при згині (МПа)

№ точки	Міцність на стиск		Міцність на розтяг при згині	
	у віці 3 діб	у віці 28 діб	у віці 3 діб	у віці 28 діб
1	24,0	36,1	2,76	3,68
2	26,6	39,3	2,94	3,97
3	27,4	40,4	3,41	4,58
4	25,5	38,8	3,28	4,46
5	26,9	40,7	3,41	4,60
6	33,6	49,7	3,89	5,23
7	32,0	48,2	4,09	5,50
8	34,9	52,2	4,23	5,68
9	34,8	51,8	4,14	5,62
10	34,1	51,5	4,23	5,67
11	36,2	54,3	3,89	5,29
12	38,8	58,5	4,13	5,56
13	39,2	59,6	4,71	6,35
14	37,0	56,4	4,49	6,11
15	39,2	59,8	4,62	6,30

За даними, веденими у таблиці 2, були побудовані відповідні ЕС-моделі, які відображають вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск фібробетонів у віці відповідно 3 і 28 діб:

$$f_{cm,3} \text{ (МПа)} = 34,54 + 6,00x_1 - 1,14x_1^2 \pm 0x_1x_2 + 0,10x_1x_3 + 0,35x_2 - 0,59x_2^2 - 0,20x_2x_3 + 1,16x_3 - 1,04x_3^2 \quad (2)$$

$$f_{cm} \text{ (МПа)} = 51,58 + 9,33x_1 - 1,43x_1^2 \pm 0x_1x_2 + 0,31x_1x_3 + 0,94x_2 - 0,78x_2^2 - 0,26x_2x_3 + 1,63x_3 - 1,43x_3^2 \quad (3)$$

За даними ЕС-моделями побудовані діаграми, які показані на рис. 2.

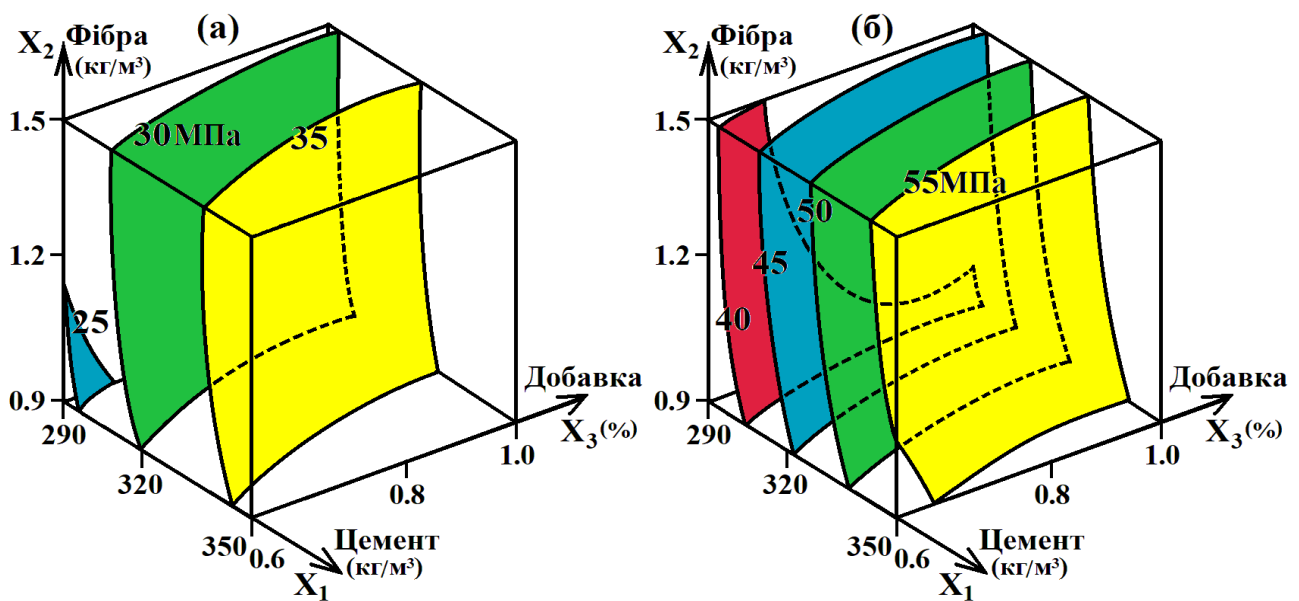


Рис. 2. Вплив варійованих факторів на міцність фібробетонів на стиск у віці 3-х (а) і 28-ми діб (б)

Як видно з діаграм на рис. 2, загальний вплив варійованих факторів на міцність при стиску у ранньому і проектному віці є аналогічним. При цьому у віці 3 дів міцність на стиск досліджених фібробетонів становить 65-68% від їх міцності у 28 денному віці.

За рахунок підвищення кількості портландцементу у складі міцність фібробетонів очікувано зростає, при цьому більш відчутно у проектному віці (до 47%). При підвищенні кількості базальтової фібри з 0,9 до 1,5 кг/м³ міцність на стиск досліджених фібробетонів несуттєво зростає: на 0,7-1,0 МПа у віці 3 дів та на 1,5-2,1 МПа у віці 28 дів. Підвищення дозування суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G з 0,6 до 0,9-1% від маси цементу викликає зниження В/Ц, за рахунок чого міцність на стиск бетонів зростає у віці 3 дів на 2,3-2,6 МПа, у віці 28 дів – на 3,2-3,8 МПа.

Досить обмежене зростання міцності на стиск при збільшенні кількості базальтової фібри і суперпластифікатору обумовлено тим, що в межах факторного простору експерименту вже при мінімальних рівнях факторів x_2 і x_3 (0,9 кг/м³ фібри і 0,6% добавки) вони оказують досить відчутний вплив на міцність бетону, що було встановлено на першому етапі експериментальних досліджень [19].

Проте для бетонів жорстких дорожніх покриттів більш важливим показником якості, ніж міцність на стиск, є міцність на розтяг при згині. Цей показник є одним з основних при розрахунку конструкції доріг з жорстким покриттям [20], що обумовлено особливостями навантажень на дорожній одяг [2, 5].

За наведеними у таблиці 2 даними були побудовані відповідні ЕС-моделі, аналогічні (2) і (3), які відображають вплив варійованих факторів складу на міцність на розтяг при згині досліджених фібробетонів у віці 3 і 28 дів. За ЕС-моделями були побудовані діаграми у формі кубів, які показані на рис. 3.

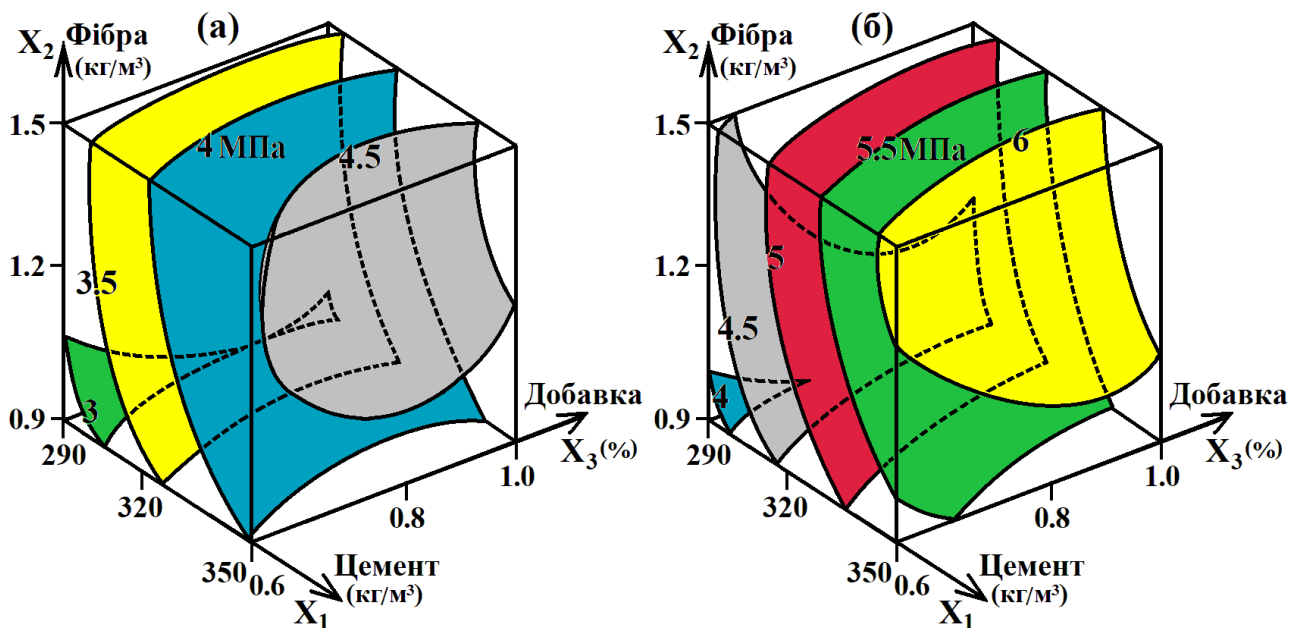


Рис. 3. Вплив варійованих факторів на міцність фібробетонів на розтяг при згині у віці 3-х (а) і 28-ми дів (б)

Аналіз діаграм та даних таблиці 2 показує, що вже у віці 3 дів міцність досліджених фібробетонів на розтяг при згині становить 73-75% від рівня їх проектною міцності у віці 28 дів. Це важливо з точки зору можливості проведення необхідних подальших технологічних операцій, зокрема нарізання швів.

Найбільш суттєво на рівень міцності на розтяг при згині впливає кількість цементу у складі. За рахунок підвищення дозування в'язучого з 290 до 350 кг/м³ міцність фібробетону підвищується приблизно на 1,2 МПа у віці 3 дів та на 1,6-1,8 МПа у віці 28 дів. Зміна

кількості суперпластифікатору в межах факторного простору експерименту несуттєво впливає на міцність фібробетонів на розтяг – при збільшенні кількості добавки STACHEMENT 2570/5/G з 0,6 до 0,9% від маси цементу міцність зростає лише на 0,25-0,35 МПа.

За рахунок збільшення кількості базальтової фібри з 0,9 до 1,3-1,4 кг/м³ міцність на розтяг при згині фібробетону у віці 3 діб зростає на 0,5-0,6 МПа, у віці 28 діб – на 0,7-0,8 МПа. Тобто дисперсна арматура достатньо ефективно підвищує міцність бетонів дорожніх покриттів на розтяг при згині.

Таким чином в досліджених фібробетонах кількість базальтової фібри BAUCON®-bazalt 1,3 кг/м³ можна визнати раціональною з позиції досягнення високої міцності на розтяг при згині, а також на стиск. Аналогічним чином раціональною кількістю суперпластифікатору STACHEMENT 2570/5/G можна визнати 0,9% від маси цементу.

Висновки і перспективи подальших досліджень. За рахунок реалізації планованого експерименту отримано комплекс ЕС-моделей, які описують вплив кількості цементу, суперпластифікатору на основі полікарбоксилатів і базальтової фібри на ранню і проектну міцність фібробетонів жорсткого дорожнього покриття.

Завдяки застосуванню раціональної кількості базальтової дисперсної арматури і суперпластифікатору отримано фібробетони з міцністю на стиск від 40 до 55 МПа та з міцністю на розтяг при згині від 4,5 до 6 МПа в залежності від кількості цементу у складі. Також отримані бетони характеризуються високою ранньою міцністю.

У подальших дослідженнях передбачено визначення впливу кількості полікарбоксилатного суперпластифікатору і базальтової фібри на морозостійкість і зносостійкість фібробетонів жорстких дорожніх покриттів. Це обумовлено тим, що самі ці показники в значній мірі забезпечують довговічність дорожніх цементобетонів в типових для України та більшості європейських країн умовах експлуатації.

Література

1. S. Jiang, Y. Wang, X. Wang, Z. Liu, Q. Liu, C. Li, P. Li. Numerical analysis on the structure design of precast cement concrete pavement slabs. *Coatings*. 2022, 12, 1051. <https://doi.org/10.3390/coatings12081051>.
2. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. [Чинний від 2016-04-01]. Вид. офіц. Київ, 2015. 113 с.
3. I. Hussain, B. Ali, T. Akhtar, M.S. Jameel, S.S. Raza, Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). *Case Studies in Construction Materials*. 2020, 13, e00429. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>.
4. H. Wu, X. Qin, X. Huang, S. Kaewunruen. Engineering, mechanical and dynamic properties of basalt fiber reinforced concrete. *Materials*. 2023, 16, 623. <https://doi.org/10.3390/ma16020623>.
5. Толмачов С.М., Беліченко О.А., Дядюшко Р.В. Вплив поліпропіленової фібри x-mesh на властивості дорожнього бетону. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, 2021, вип. 198. С. 58-65.
6. Ž. Kos, S. Kroviakov, V. Kryzhanovskiy, A. Crnoja. Influence of fibers and hardening accelerator on the concrete for rigid pavements. *Magazine of Concrete Research*, 2023, Volume 75, Issue 17, pp. 865-873 <https://doi.org/10.1680/jmacr.22.00181>
7. A. Kimteta, M.S. Thakur, P. Sihag, A. Upadhyaya, N. Sharma. Prediction of flexural strength of FRC pavements by soft computing techniques. *Archives of Materials Science and Engineering* 2022, 117 (1), pp. 13-24 <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.1393>.
8. S.J. Jin, Y.H. Yang, Y.M. Sun, X. Li, J.Y. Xu. Experimental research on anti-freezing and thawing performance of basalt fiber reinforced fly ash concrete in the corrosive conditions. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2023, 27, pp. 3455–3470. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1969-9>.

9. Марущак У.Д., Саницький М.А., Королько С.В. Наномодифіковані швидкотверднучі бетони, армовані дисперсними волокнами. Вісник НУ "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. 2017, 877. С. 137-143.
10. Толмачов С.М. Особливості повітроутягнення у дорожні бетони та фібробетони. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2017, Вип. 99. С.67-76.
11. Z. Lyu, A. Shen, W. Meng. Properties, mechanism, and optimization of superabsorbent polymers and basalt fibers modified cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 2021, 276, 122212, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122212>.
12. A. Sarkar, M. Hajihosseini. The effect of basalt fibre on the mechanical performance of concrete pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 2018, 21 (6), pp. 1726-1737, <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1561379>.
13. P. Iyer, S.Y. Kenno, S. Das. Mechanical properties of fiber-reinforced concrete made with basalt filament fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27 (11), 04015015, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001272](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001272).
14. U. Marushchak, M. Sanytsky, S. Korolko, Y. Shabatura, N. Sydor. Development of nanomodified rapid hardening fiber-reinforced concretes for special-purpose facilities. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, 2/6 (92), pp. 34-41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127001>.
15. Ž. Kos, S. Kroviakov, A. Mishutin, A. Poltorapavlov. An experimental study on the properties of concrete and fiber-reinforced concrete in rigid pavements. *Materials*, 2023, 16 (17), 5886 <https://doi.org/10.3390/ma16175886>.
16. U. Marushchak, M. Sanytsky, N. Sydor, S. Braichenko. Research of impact resistance of nanomodified fiber-reinforced concrete. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 230, 03012 <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823003012>.
17. T.V. Lyashenko, V.A. Voznesenskiy. Composition-process fields methodology in computational building materials science. 2017, Astroprint, 168 p.
18. L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov. Mathematical experiment planning in concrete technology. 2012, Nova Science Publishers, 173 p.
19. S. Kroviakov, L. Shestakova. Influence of basalt fiber and air-entraining admixture on the properties of rigid concrete pavement. *Romanian Journal of Materials*. 2023, 53 (2), pp. 170-175
20. ГБН В.2.3-37641918-557:2016. Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ, 2016. 75 с.

References

- [1] S. Jiang, Y. Wang, X. Wang, Z. Liu, Q. Liu, C. Li, P. Li., "Numerical analysis on the structure design of precast cement concrete pavement slabs", *Coatings*, 12, 1051, 2022. <https://doi.org/10.3390/coatings12081051>.
- [2] DBN V.2.3-4:2015. Avtomobil'ni dorohy. Sporudy transportu. Chastyna I. Proektuvannya. Chastyna II. Budivnytstvo. Minrehionbud Ukrayiny, 2015.
- [3] I. Hussain, B. Ali, T. Akhtar, M.S. Jameel, S.S. Raza, "Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene)", *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00429, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429>.
- [4] H. Wu, X. Qin, X. Huang, S. Kaewunruen, "Engineering, mechanical and dynamic properties of basalt fiber reinforced concrete", *Materials*, 16, 623, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16020623>.
- [5] S.M. Tolmachov, O.A. Byelichenko, R.V. Dyadyushko, "Vplyv polipropilenovoyi fibry x-mesh na vlastyvoli dorozhn'oho betonu", *Zbirnyk naukovykh prats' UkrDUZT*, 198, pp. 58-65. 2021.

- [6] Ž. Kos, S. Kroviakov, V. Kryzhanovskiy, A. Crnoja, "Influence of fibers and hardening accelerator on the concrete for rigid pavements", *Magazine of Concrete Research*, vol. 75, Issue 17, pp. 865-873, 2023. <https://doi.org/10.1680/jmacr.22.00181>.
- [7] A. Kimteta, M.S. Thakur, P. Sihag, A. Upadhy, N. Sharma, "Prediction of flexural strength of FRC pavements by soft computing techniques", *Archives of Materials Science and Engineering*, 117 (1), pp. 13-24, 2022. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.1393>.
- [8] Sj. Jin, Yh. Yang, Ym. Sun, X. Li, Jy. Xu, "Experimental research on anti-freezing and thawing performance of basalt fiber reinforced fly ash concrete in the corrosive conditions", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27, pp. 3455–3470, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1969-9>.
- [10] S.M. Tolmachov, "Osoblyvosti povitroutyahnennya u dorozhni betony ta fibrobetony", *Avtomobil'ni dorohy i dorozhnye budivnytstvo*, 99, pp. 67-76, 2017.
- [11] Z. Lyu, A. Shen, W. Meng, "Properties, mechanism, and optimization of superabsorbent polymers and basalt fibers modified cementitious composite", *Construction and Building Materials*, 276, 122212, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122212>.
- [12] A. Sarkar, M. Hajihosseini, "The effect of basalt fibre on the mechanical performance of concrete pavement", *Road Materials and Pavement Design*, 21 (6), pp. 1726-1737, 2018. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1561379>.
- [13] P. Iyer, S.Y. Kenno, S. Das, "Mechanical properties of fiber-reinforced concrete made with basalt filament fibers", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (11), 04015015, 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001272](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001272).
- [14] U. Marushchak, M. Sanytsky, S. Korolko, Y. Shabatura, N. Sydor, "Development of nanomodified rapid hardening fiber-reinforced concretes for special-purpose facilities", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/6 (92), pp. 34-41, 2018. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127001>.
- [15] Ž. Kos, S. Kroviakov, A. Mishutin, A. Poltorapavlov, "An experimental study on the properties of concrete and fiber-reinforced concrete in rigid pavements", *Materials*, 16 (17), 5886, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16175886>.
- [16] U. Marushchak, M. Sanytsky, N. Sydor, S. Braichenko, "Research of impact resistance of nanomodified fiberreinforced concrete", *MATEC Web of Conferences*, 230, 03012, 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823003012>.
- [17] T.V. Lyashenko, V.A. Voznesenskiy, *Composition-process fields methodology in computational building materials science*. Astroprint, 2017.
- [18] L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov, *Mathematical experiment planning in concrete technology*. tNova Science Publishers, 173 p. 2012.
- [19] S. Kroviakov, L. Shestakova, "Influence of basalt fiber and air-entraining admixture on the properties of rigid concrete pavemen", *Romanian Journal of Materials*, 53 (2), pp. 170-175, 2023.
- [20] HBN V.2.3-37641918-557:2016. *Avtomobil'ni dorohy. Dorozhniy odyah zhorstkyy. Proektuvannya*. Ministerstvo infrastruktury Ukrayiny, 2016.

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

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

¹**Shestakova L.E.**,

shestakova_luba@ukr.net, ORCID 0000-0002-3449-8498

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

Abstract. The experiment was conducted according to a 15-point symmetrical plan. The following factors of the fiber concrete composition of the rigid pavements were varied: the amount of Portland cement (from 290 to 350 kg/m³), the amount of BAUCON®-basalt fiber with a length of fibers 12 mm and a diameter of 18 μm (from 0.9 to 1.5 kg/m³), the amount of superplasticizer STACHEMENT 2570/5/G (from 0.6 to 1% of the mass of cement). All mixtures had equal mobility with a cone slump of 2..3 cm, which was achieved by selecting the amount of water with appropriate adjustment of the fiber concrete composition.

It was found that the W/C of a concrete mixture of equal mobility decreases as expected with an increase in the amount of Portland cement. The W/C of the mixture is reduced by increasing the amount of superplasticizer to 0.9-1.0% of the cement mass. When increasing the amount of basalt fiber from 0.9 to 1.5 kg/m³, W/C practically does not change.

The compressive and flexural strength of fiber concrete at the age of 3 and 28 days was determined. It was found that the general nature of the influence of various factors on strength in early and project age is similar. The compressive strength of the investigated fiber concrete at the age of 3 days is 65-68% of the level of their strength at the age of 28 days. The flexural strength at the age of 3 days is 73-75% of the 28-day strength.

The strength of fiber concrete is expected to increase due to the increase in the amount of Portland cement in the composition. At the same time, the strength increases more noticeably in the project age. When increasing the amount of basalt fiber from 0.9 to 1.5 kg/m³, the compressive strength increases insignificantly. Increasing the dosage of superplasticizer from 0.6 to 0.9-1% causes a decrease in W/C, due to which the compressive strength of fiber concrete increases. The strength at the age of 3 days increases by 2.3-2.6 MPa, at the age of 28 days increases by 3.2-3.8 MPa.

The level of flexural strength is most significantly affected by the amount of cement in the composition. The flexural strength of fiber concrete at the age of 3 days increases by 0.5-0.6 MPa due to an increase in the amount of basalt fiber from 0.9 to 1.3-1.4 kg/m³. At the age of 28 days, the strength increases by 0.7-0.8 MPa. Changing the amount of superplasticizer within the factor space of the experiment does not significantly affect the flexural strength of fiber concrete.

Thus, the amount of basalt fiber BAUCON®-basalt 1.3 kg/m³ can be considered rational in the investigated fiber concretes. The amount of superplasticizer STACHEMENT 2570/5/G of 0.9% by weight of cement is also rational.

Fiber concrete with compressive strength from 40 to 55 MPa and with flexural strength at bending from 4.5 to 6 MPa, depending on the amount of cement in the composition, was obtained thanks to the use of a rational amount of basalt dispersed reinforcement and superplasticizer.

Keywords: rigid pavement, basalt fiber, superplasticizer, strength, planned experiment.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2023

EFFECT OF DEICING AGENTS ON THE WATER STABILITY OF ASPHALT CONCRETE UNDER FREEZE-THAW CYCLES

¹**Serdyuk V. R.**, Doctor of Technical Sciences,
serdyukvr@vntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2284-7371
¹**Khrystych O. B.**, Ph.D. in Engineering, Associate Professor,
dockhristich@i.ua, ORCID: 0000-0003-0166-547X
¹*Vinnytsia National Technical University*
Voiniv-Internatsionalistiv St, 7, Vinnytsia, 21000, Ukraine

Abstract. Asphalt concrete pavement, as the main form of high-grade roads today, occupies an important place in modern road construction due to its advantages such as low noise level, ease of repair and short construction period. This road type is widely adopted worldwide and provides a reliable foundation for road networks in cities and villages. In cold regions, snowy weather tends to cause ice on the road surface, posing a serious safety hazard for vehicle travel. The problem of road accidents in winter is relevant both for regions with extremely cold climatic conditions and for the temperate continental climate that prevails almost throughout Ukraine. To solve this problem, deicing agents are widely used to improve the safety of road travel. The application of deicing agents effectively reduces the impact of snow and ice on roads and ensures the safe passage of vehicles in adverse weather conditions. However, while deicing agents play an important role in improving traffic flow, their widespread use has also brought some problems that should not be ignored. The chemicals in deicing agents may have adverse effects on pavement materials, especially on asphalt concrete roads.

For studying the effect of deicing agents on asphalt concrete, this paper presents an experimental investigation of the effect of deicing agents on the water stability of asphalt concrete under the conditions of freeze-thaw cycle test. The impact of deicing agents and freeze-thaw cycles on asphalt concrete was investigated by evaluating the variation patterns of three key parameters: stability, residual stability and air void content.

The experimental results showed that the stability and residual stability of asphalt concrete showed an overall decreasing trend with the increase of the number of freeze-thaw cycles, indicating that the asphalt concrete was damaged or degraded under the conditions of freeze-thaw cycles. The higher concentration of the deicer solution corresponded to the more pronounced changes in the test parameters, indicating a significant effect of the deicer on the asphalt concrete. At the end of 27 cycles, the average loss of stability, residual stability and void ratio were 29%, 22% and 73%, respectively. This indicates that the combined effect of freeze-thaw cycles and deicing agent is more significant for air void content.

Key words: asphalt concrete, deicing agent, water stability, freeze-thaw cycle, pavement performance.

Introduction. The problem of road accidents in winter is relevant both for regions with extremely cold climatic conditions and for the temperate continental climate that prevails almost throughout Ukraine [1-2]. In order to effectively deal with this problem, the extensive use of deicing agents has become an indispensable measure to ensure road traffic safety. The main function of deicers is to melt snow and ice as quickly as possible, improving the grip of vehicles and effectively reducing the number of traffic accidents [3-4].

However, while deicing agents play a key role in improving traffic flow, their long-term effects on road materials are a growing concern [5-6]. With the widespread use of deicing agents, especially chemical deicers like calcium chloride (CaCl_2) being used in large quantities, close attention is being paid to the potential impacts of these chemicals on road materials. In this context, asphalt concrete, a key material commonly used in road construction, has excellent compressive,

shear and durability properties that make it the material of choice for road construction [7-8]. However, the long-term effects of deicing agents may lead to deterioration of the asphalt in asphalt concrete, crack generation, and overall structural damage, which can negatively affect water stability [9-10].

As a result, the widespread use of deicing agents has raised concerns about the long-term health of road materials. At the core of this concern are possible interactions between the chemicals in deicing agents and road materials, which can have potentially adverse effects on the durability, structural performance and overall stability of pavements [11-12]. In order to address this concern, it is important that we conduct in-depth research into the combined impacts of deicing agents on roadway infrastructure and develop a scientific and sustainable strategy for the use of deicing agents to ensure that the long-term health of roadway materials is not jeopardized while improving the smooth flow of traffic [13].

Analysis of recent research and publications. To identify the effect of deicing agents on asphalt concrete, some scholars have conducted some research. Wu [14] investigated the water sensitivity of asphalt concrete by dry and wet cycle tests, and the findings showed that the deterioration of asphalt concrete properties was mainly related to water and deicing agents. Hassan [15] compared the effects of sodium formate, potassium acetate, and urea on the durability of asphalt concrete, with the test results showed that urea caused the most damage, while the other deicing agents caused damage comparable to distilled water. Zhang [16] conducted an in-depth study on the reaction mechanism between asphalt and deicing salt solutions, suggesting that chloride ions in the deicers replaced hydrogen ions in the asphalt. However, these related studies on the influence of CaCl₂ on the water stability of asphalt concrete are currently incomplete, thus limiting its applicability as a regionally relevant reference for road design and maintenance.

Goals and objectives. To further study the effect of CaCl₂ on the water stability of asphalt concrete, this paper carries out freeze-thaw cycles on AC – 16 asphalt concrete after immersing in different concentrations of CaCl₂ solution in order to simulate the environment to which the pavement material is subjected on the actual road, and evaluates the damage rule of the water stability through the Marshall water immersion test and the air voids content test.

Research methods. In this study, five concentrations of CaCl₂ solutions, 2%, 4%, 6%, 8% and 10%, were selected to conduct freeze-thaw cycle tests on Marshall specimens (63.5 mm ± 1.3 mm in height and 101.6 mm ± 0.2 mm in diameter) of AC – 16 asphalt concrete. The test parameters for a single cycle were as follows: freezing temperature of -18°C±1°C, freezing time of 24h±0.5h, thawing temperature of 20°C±1°C, and thawing time of 24h±0.5h. A total of 28 cycles were conducted, and the Marshall water immersion test and air void content test were carried out at the end of 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 and 27 cycles, respectively. The parameters tested included stability, residual stability and air void content.

Table 1 – Stability of asphalt concrete after multiple freeze-thaw cycles

Number of freeze-thaw cycles	Stability, kN				
	2%CaCl ₂	4%CaCl ₂	6%CaCl ₂	8%CaCl ₂	10%CaCl ₂
0	11.24	11.24	11.24	11.24	11.24
3	11.06	11.05	11.05	11.04	11.01
6	10.91	10.91	10.89	10.87	10.85
9	10.70	10.60	10.59	10.58	10.57
12	10.31	10.26	10.23	10.20	10.18
15	9.86	9.79	9.66	9.63	9.61
28	9.42	9.25	9.14	9.11	9.04
21	8.86	8.67	8.51	8.39	8.38
24	8.55	8.31	8.14	8.07	7.98
27	8.39	8.14	7.96	7.86	7.76

Results analysis and discussion. The Marshall water immersion tests were conducted on asphalt concrete after multiple freeze-thaw cycles. Results of the test for stability and residual stability are shown in Tables 1 and 2, and the corresponding loss rates are shown in Figures 1 and 2.

From the experimental data in Table 1, it can be observed that the stability of asphalt concrete gradually decreases as the number of freeze-thaw cycles increases. This indicates that the asphalt concrete was damaged or degraded to some extent under freeze-thaw cycling conditions. Meanwhile, it was observed that at each number of freeze-thaw cycles, the stability showed a different trend with the increase of CaCl₂ concentration, and this trend was more obvious with the increase of the number of freeze-thaw cycles. At the end of 27 cycles, the stability corresponding to different concentrations of CaCl₂ solutions were 8.39 kN, 8.14 kN, 7.96 kN, 7.86 kN, and 7.76 kN, respectively. It can be observed from Fig. 1 that the loss rate of stability shows a trend of slowly increasing at first, followed by an extremely rapid increase, and then finally a slow increase. At the end of 27 cycles, the loss rates of stability corresponding to different concentrations of CaCl₂ solutions were 25.38%, 27.62%, 29.17%, 30.06% and 30.95%, respectively.

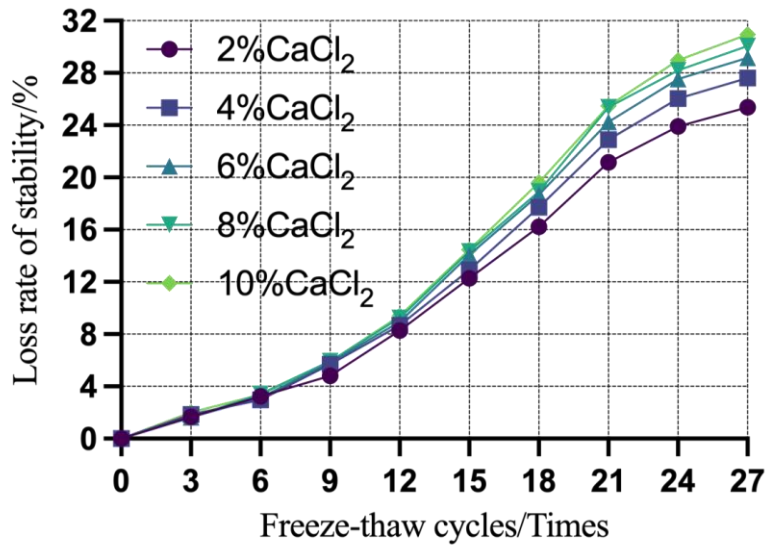


Fig. 1. Loss rate of stability of asphalt concrete after experiencing multiple freeze-thaw cycles

Table 2 – Residual stability of asphalt concrete after multiple freeze-thaw cycles

Number of freeze-thaw cycles	Residual stability, %				
	2%CaCl ₂	4%CaCl ₂	6%CaCl ₂	8%CaCl ₂	10%CaCl ₂
0	85.70	85.70	85.70	85.70	85.70
3	84.72	84.65	84.44	84.35	84.17
6	83.73	83.67	83.50	83.24	83.20
9	82.65	82.05	81.85	81.34	81.12
12	80.83	80.66	80.04	79.71	79.44
15	78.52	77.55	76.82	75.83	75.61
28	75.79	74.29	73.78	72.67	71.61
21	72.65	71.33	70.65	68.95	68.25
24	71.12	69.44	68.35	66.82	65.64
27	69.78	68.11	67.30	65.25	64.40

From Table 2, it can be observed that there is a gradual decrease in residual stability as the number of freeze-thaw cycles increases. This is in line with the expectation since freeze-thaw cycles usually lead to deterioration and decrease in the stability of the material. Meanwhile, it was observed that the value of residual stability corresponding to the higher concentration of CaCl₂ solution was smaller for the same number of freeze-thaw cycles, indicating a remarkable effect of deicing agents on the water stability of asphalt concrete. At the end of 27 cycles, the residual

stability corresponding to different concentrations of CaCl₂ solutions were 69.78%, 68.11%, 67.30%, 65.25% and 64.40%, respectively. It can be observed from Fig. 2 that similar to the loss rate of stability, the loss rate of residual stability also showed a trend of slowly increasing at first, followed by an extremely rapid increase and finally a slow increase. At the end of 27 cycles, the loss rates of residual stability corresponding to different concentrations of CaCl₂ solutions were 18.58%, 20.52%, 21.47%, 23.86% and 24.85%, respectively.

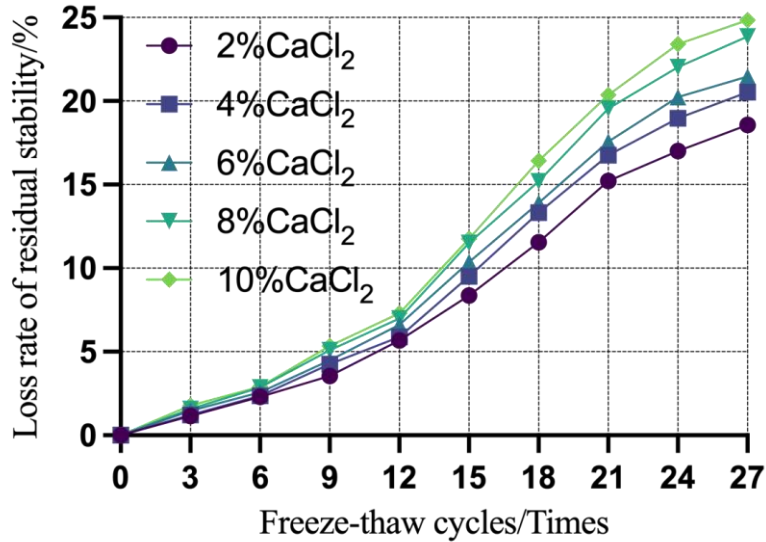


Fig. 2. Loss rate of residual stability of asphalt concrete after experiencing multiple freeze-thaw cycles

A comprehensive comparison of the experimental data on stability and residual stability revealed that at the end of 27 cycles, the average loss rate of stability was around 29%, while the average loss rate of residual stability was around 22%, indicating that the combined effect of freeze-thaw cycles and deicing agents is greater for stability. Meanwhile, at the end of 27 cycles, the loss rate of stability corresponding to 10% CaCl₂ solution was 21.9% higher than that corresponding to 2% CaCl₂ solution, and the loss rate of residual stability corresponding to 10% CaCl₂ solution was 33.8% higher than that corresponding to 2% CaCl₂ solution, which indicates that the effect of deicing agent is more important for residual stability.

The air void content test was carried out on asphalt concrete after undergoing multiple freeze-thaw cycles, the experimental data on air void content are shown in Table 3, and its corresponding loss rate is shown in Figure 3.

Table 3 – Air void content of asphalt concrete after multiple freeze-thaw cycles

Number of freeze-thaw cycles	Air void content, %				
	2%CaCl ₂	4%CaCl ₂	6%CaCl ₂	8%CaCl ₂	10%CaCl ₂
0	4.12	4.12	4.12	4.12	4.12
3	4.24	4.25	4.27	4.29	4.30
6	4.42	4.46	4.47	4.49	4.56
9	4.59	4.64	4.65	4.74	4.76
12	4.79	4.87	4.88	4.94	5.02
15	5.10	5.13	5.22	5.31	5.33
28	5.40	5.53	5.59	5.70	5.80
21	5.78	5.99	6.04	6.19	6.33
24	6.27	6.44	6.61	6.81	6.91
27	6.74	6.94	7.09	7.33	7.51

From Table 3, it can be observed that the air void content of asphalt concrete shows an overall increasing trend with the increase in the number of freeze-thaw cycles due to the fact that the freeze-thaw cycles may lead to the deterioration of asphalt concrete materials, which increases the air void content. Also, it was observed that for the same number of freeze-thaw cycles, the air void content showed an overall increasing trend with the increase in CaCl_2 concentration, which indicates that the deicing agent had a certain effect on the air void content of the asphalt concrete. At the end of 27 cycles, the air void content corresponding to different concentrations of CaCl_2 solutions were 6.74%, 6.94%, 7.09%, 7.33% and 7.51%, respectively. It can be observed from Fig. 2 that the growth rate of air void content shows a trend of slow increase at first and then a rapid increase afterwards. At the end of 27 cycles, the growth rates of air void content corresponding to different concentrations of CaCl_2 solution were 63.58%, 68.47%, 72.04%, 77.86% and 82.16%, respectively. The average growth rate was about 73%, which was significantly higher than the loss rate of stability and residual stability, indicating that the air void content was greatly affected by the freeze-thaw cycle, which indirectly indicated that the freeze-thaw cycle caused the destruction of the asphalt membrane inside the asphalt concrete.

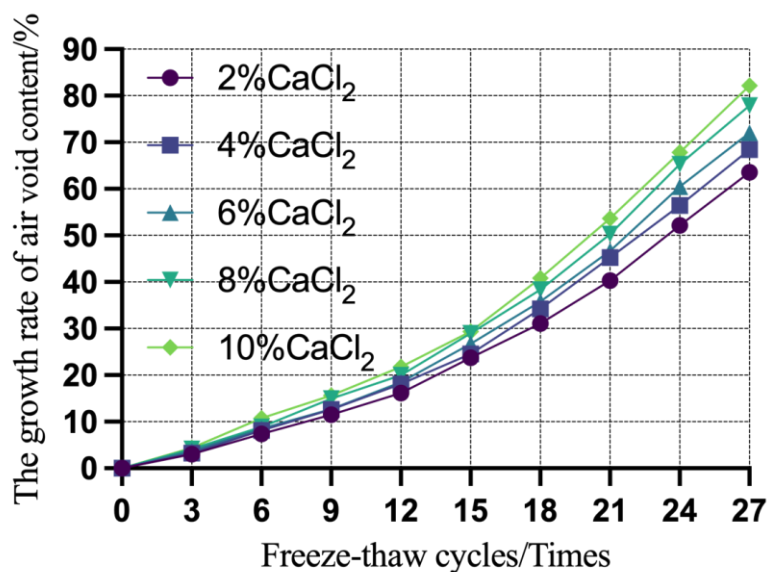


Fig. 3. Growth rate of air void content of asphalt concrete after experiencing multiple freeze-thaw cycles

Conclusion. In this paper, the following conclusions can be drawn by comparing and analyzing the experimental data of stability, residual stability and air void content of AC-16 asphalt concrete by conducting freeze-thaw cycle tests:

1. As the number of freeze-thaw cycles increased, the stability and residual stability of asphalt concrete showed an overall decreasing trend, indicating that asphalt concrete was damaged or degraded under freeze-thaw cycle conditions.
2. The loss rates of stability and residual stability corresponding to 10% CaCl_2 solution were 21.9% and 33.8% higher than those corresponding to 2% CaCl_2 solution, respectively. This indicates that the effect of high concentration of CaCl_2 on residual stability is more significant.
3. The higher concentration of deicer solution corresponded to the more significant changes in the test parameters, indicating the significant effect of deicer on asphalt concrete.
4. At the end of 27 cycles, the average losses of stability, residual stability and air void content were 29%, 22% and 73%, respectively. This suggests that the combined effect of freeze-thaw cycles and deicing agent has a more significant effect on air void content.

References

- [1] H. R. Vignisdottir et al., "A review of environmental impacts of winter road maintenance", *Cold Regions Science and Technology*, vol. 158, pp. 143–153, 2019.
- [2] M. O. Rivett et al., "Highway deicing salt dynamic runoff to surface water and subsequent infiltration to groundwater during severe UK winters", *Science of the Total Environment*, vol. 565, pp. 324–338, 2016.
- [3] J.-S. Chung, B.-H. Kim, and I.-S. Kim, "A case study on chloride corrosion for the end zone of concrete deck subjected to de-icing salts added calcium chloride", *Journal of the Korean Society of Safety*, vol. 29, no. 6, pp. 87–93, 2014.
- [4] C. D. Johnston, "Deicer Salt Scaling Resistance, Chloride Permeability and Code Requirements for Air Content, Spacing Factor", *Concrete International*, vol. 16, no. 8, pp. 48–55, 1994.
- [5] Y. Meng et al., "Deicing characteristics and pavement performance of eco-friendly de-icing asphalt mixture", *Construction and Building Materials*, vol. 360, p. 129565, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129565.
- [6] J. B. Shanley, "Effects of Ion Exchange on Stream Solute Fluxes in a Basin Receiving Highway Deicing Salts", *Journal of Environmental Quality*, vol. 23, no. 5, pp. 977–986, 1994, doi: 10.2134/jeq1994.00472425002300050019x.
- [7] L. Wang, Li. Gong, and Y. Xing, "Influence factors of salt freeze-thaw cycle on asphalt mixture properties", *Journal of Functional Materials*, vol. 47, no. 4, pp. 88–93, 2016.
- [8] Z. Zhou, H. Li, X. Liu, and W. He, "Investigation of sea salt erosion effect on the asphalt-aggregate interfacial system", *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 13, no. 2, pp. 145–153, 2020, doi: 10.1007/s42947-019-0095-2.
- [9] F. Jin, G. Zhang, Y. Jin, Y. Watanabe, A. Kishita, and H. Enomoto, "A new process for producing calcium acetate from vegetable wastes for use as an environmentally friendly deicer", *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 19, pp. 7299–7306, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.04.081.
- [10] R. Chang and P. Hao, "Effect of salt freeze-thaw cycle on low temperature performance of asphalt mixture", *Journal of Building Materials*, vol. 20, no. 3, pp. 481–488, 2017.
- [11] Y. Cui, J. Han, Z. Li, S. Zhang, and Z. Liu, "Effect of salt-freezing cycle on properties and microstructure of asphalt", *Journal of Functional Materials*, vol. 46, no. 18, pp. 18037–18042, 2015.
- [12] Z. Liu and W. Hansen, "Freezing characteristics of air-entrained concrete in the presence of deicing salt", *Cement and Concrete Research*, vol. 74, pp. 10–18, 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.03.015.
- [13] N. Buss, K. N. Nelson, J. Hua, and R. A. Relyea, "Effects of different roadway deicing salts on host-parasite interactions: The importance of salt type", *Environmental Pollution*, vol. 266, p. 115244, 2020, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115244.
- [14] Z. Wu, C. Shi, P. Gao, H. Zhang, and X. Hu, "Moisture Susceptibility of Asphalt Mixture Subjected to Chloride-Based Deicing Salt Solutions under Simulated Environmental Conditions", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 35, no. 5, p. 04023052, 2023, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004713.
- [15] Y. Hassan, A. O. Abd El Halim, A. G. Razaqpur, W. Bekheet, and M. H. Farha, "Effects of Runway Deicers on Pavement Materials and Mixes: Comparison with Road Salt", *Journal of Transportation Engineering*, vol. 128, no. 4, pp. 385–391, 2002, doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:4(385).
- [16] X. Zhang, H. Chen, and I. Hoff, "The mutual effect and reaction mechanism of bitumen and de-icing salt solution", *Construction and Building Materials*, vol. 302, p. 124213, 2021.

**ВПЛИВ ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ РЕЧОВИН НА ВОДОСТІЙКІСТЬ
АСФАЛЬТОБЕТОНУ В УМОВАХ ЦИКЛІВ ЗАМОРОЖУВАННЯ-ВІДТАВАННЯ**

¹Сердюк В. Р., д.т.н., професор,
serdyukvr@vntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-2284-7371

¹Христич О. В., к.т.н., доцент,
dockhristich@i.ua, ORCID: 0000-0003-0166-547X

¹Вінницький національний технічний університет
вул. Воїнів-Інтернаціоналістів, 7, м. Вінниця, 21000, Україна

Анотація. Асфальтобетонне покриття, як основна форма високоякісних доріг, займає важливе місце в сучасному дорожньому будівництві завдяки своїм перевагам, таким як низький рівень шуму, простота ремонту та короткий термін будівництва. Цей тип доріг широко застосовується в усьому світі і забезпечує надійну основу для дорожніх мереж у містах і селах. Проблема дорожньо-транспортних пригод взимку актуальна як для регіонів з досить холодними кліматичними умовами, так і для помірно-континентального клімату, який переважно характерний майже для всієї території України. Для вирішення цієї проблеми широко застосовуються протижеледні речовини, що сприяють підвищенню безпеки дорожнього руху. Застосування протижеледних реагентів ефективно зменшує вплив ожеледі та снігу на дороги і забезпечує безпечний проїзд транспортних засобів за несприятливих погодних умов. Однак, незважаючи на те, що протижеледні суміші відіграють важливу роль у поліпшенні транспортного потоку, їх масштабне використання також створює певні проблеми, на які варто звернути увагу. Хімічні речовини, що входять до складу протижеледних реагентів, можуть мати негативний вплив на матеріали дорожнього покриття, особливо на асфальтобетонних дорогах.

З метою вивчення впливу протижеледних речовин на властивості асфальтобетону проведено експериментальне дослідження стосовно дії протижеледних речовин на водостійкість асфальтобетону в умовах циклів заморозування та відтавання. Вплив протижеледних речовин при циклічному заморозуванні-відтаванні на асфальтобетон досліджується шляхом оцінки закономірностей зміни трьох ключових параметрів: стабільності, залишкової стабільності та залишкової пористості.

Результати експерименту показали, що стабільність і залишкова стабільність асфальтобетону мали загальну тенденцію до зниження при збільшенні кількості циклів заморозування-відтавання, що вказує на часткове пошкодження або розшарування асфальтобетону в умовах циклів заморозування-відтавання. Вища концентрація розчину протижеледної речовини характеризувалася більш вираженими змінами параметрів дослідження, що свідчить про значний вплив протижеледної речовини на властивості асфальтобетону. Після 27 циклів випробувань середні показники втрати стійкості, залишкової стійкості та залишкової пористості становили 29%, 22% та 73% відповідно. Це свідчить про те, що вплив протижеледного реагенту при циклічному заморозуванні-відтаванні має вагомий вплив на показник залишкової пористості.

Ключові слова: асфальтобетон, протижеледна речовина, водостійкість, цикл заморозування-відтавання, експлуатаційні характеристики дорожнього покриття.

Стаття надійшла до редакції 12.11.2023

THE RESULTS OF THEORETICAL STUDIES FOR DETERMINING OPERATIONAL LOADS ON GRAVITY-TYPE BERTHING STRUCTURES

¹**Khoneliia N.N.**, PhD in Engineering, Associate Professor, khonelianatela@gmail.com, ORCID: 0009-0000-4323-0293

¹**Lopatin K.O.**, graduate student, SLodessa80@gmail.com, ORCID: 0009-0002-0794-8366

¹*Odessa National Maritime University*
34, Mechnikova st., Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. The current waterfront of Ukrainian ports includes structures that have been developed in the past and have over 50 years of experience. Open-piled quay walls and sheet-pile quay walls are the most common types of quay walls used for berths in Ukrainian ports. However, there are gravity-type quay walls. The share in the total the waterfront is not large. They were built in the past and require modernization and reconstruction. Most of these berthing structures have defects in concrete and reinforcement, which reduce the durability and bearing capacity.

Furthermore, the development of freight and passenger maritime traffic and the construction of modern ships led to the need to increase the depths at existing berths and define the operational loads meeting modern requirements.

Thus, the issue of reconstruction of gravity-type quay walls is relevant for many ports of Ukraine. The choice of the reconstruction method depends on the correct estimation of the actual technical condition of an existing structure. Gravity-type structures are those that rely primarily on their weight and grip on the foundations to resist any possible adverse load combinations. The requirements for such structures lead to the solution of one of the main tasks – the determination of the reactive capacity of the soil base.

The reactive capacity calculation of the soil bases for considered structures is essential. The purpose of the calculation is to provide both strength and stability of soil bases. An improved method for determining the reactive capacity of the soil base of gravity-type quay walls has been developed. This method allows determining the reactive capacity of the soil base in conditions of the mixed stress state (limit and sublimit stress state zones in the soil base are considered).

This paper reviews some results of applying the proposed method for the reactive capacity estimation of the soil base of gravity-type quay walls. The obtained results have been used to analyze the preliminary reconstruction options for the mentioned structures and determine operational loads.

Keywords: the reactive capacity, gravity-type quay wall, limit and sublimit stress state, reconstruction and operational loads.

Introduction. The sea ports are the most important component of Ukraine's transport infrastructure and export potential. The transport complex competitiveness in the world market depends on sea ports functioning efficiency, the level of their technological and technical equipment, the management system and the development of infrastructure with modern international requirements.

The main conditions for the development of sea ports are the reconstruction and renovation of existing ones and also the construction of new deep-water transshipment complexes that allow the serving of large sea vessels. The current waterfront of Ukrainian ports includes structures that have over 50 years of experience. Open-piled quay walls and sheet-pile quay walls are the most common types of quay walls used for berths in Ukrainian ports. However, there are gravity-type quay walls. The share in the total waterfront accounts for approximately 10%. They have been built in the past and require modernization and reconstruction.

The constantly growing cargo turnover affects the size of the marine fleet. Construction of modern vessels with drafts 12.0-17.0 m leads to the necessity of increasing the depths at existing berths and updating operational loads. Thus, the issue of reconstruction of gravity-type quay walls

is relevant due to the growing number of berths that do not meet modern requirements as well as having an exceeded design life and physical deterioration.

Statement of the problem. For the development of Ukraine as a transit state in the global transport system, it is necessary to take measures to increase transit cargo flows and solve the problem of the functioning and development of seaports.

Seaports of Ukraine have an advantageous transport and geographical position to strategic directions of cargo flows and proximity to European and Middle Eastern markets. Ports with developed infrastructure, sufficient depths, and a high level of mechanization of loading and unloading work make it possible to consider seaports of Ukraine as convenient transshipment points for transit cargo flows. Thus, the reconstruction of berths and dredging works for the renewal and development of Ukrainian port infrastructure will solve some key issues that are relevant and need to be resolved. The reconstruction method depends on the constructive scheme of the existing structure and its actual technical and deformable states.

As mentioned above, a great variety of gravity-type quay walls has been developed in the past and require modernization and reconstruction. Gravity-type structures are those that rely primarily on their weight and grip on the foundations to resist any possible adverse load combinations. The requirements for such structures lead to the solution of one of the main tasks – the determination of the reactive capacity of the soil base.

Analysis of research and publications. The traditional design method of foundations of gravity-type structures is based on the concept of bearing capacity. The fundamental basis of methods for the bearing capacity assessment of the soil bases is limit equilibrium theory. It should be noted that the practical significance of the solutions of limit equilibrium theory is used until now despite the widespread use of different elastic-plastic deformation analysis methods of soils. Static solutions of limit equilibrium theory are repeatedly tested in practice and allow reliably determine limit load value on the soil bases [1]. Therefore, the results of these solutions are included in the regulatory documents for performing calculations of the soil bases of structures [2].

The methods of the bearing capacity calculation of the soil bases based on limit equilibrium theory are described in well-known works by M.V. Malyshev [3], P.I. Yakovlev [4], S.G. Kushner [5], Yu.K. Zaretskiy [6], V.G. Fedorovskii [7], N.K. Ameta [8], J.M. Raut et al. [9].

A Literature review has been done that gives the idea of new methods for the bearing capacity calculation of the soil bases. Y. Guang-hua et al. [10] proposed a new method for determining the bearing capacity of the soil base that considers the size, buried depth, and settlement of the foundation. New solutions for the bearing capacity calculation of the soil bases with the use of modern numerical methods based on limit equilibrium theory have been analyzed by A.M Karaulov et al. [11]. However, the use of the finite element method to describe the limit state of soils remains understudied, despite its widespread use in geotechnical calculations. Researchers [12] provided information about the significant impact of soil inhomogeneity on the reactive bearing estimation of the soil base.

Based on the above, it should be noticed that a number of fundamental issues related to the development and improvement of practical methods for the reactive capacity estimation of the soil bases of gravity-type quay walls remain unresolved.

The purpose of the studies is to apply the proposed method of the reactive capacity calculation of the soil base for some gravity-type quay walls [13, 14]. Special attention is given to the reconstruction issues of gravity-type quay walls and clarification of the scheme of permissible operational loads.

The research method is theoretical with the development of a calculation model of the "structure – soil base" system, which allows determining the reactive capacity of the soil base of a gravity-type berthing structure as well as estimating the reserves of its bearing capacity.

The results of the research. According to the instruction of the document [15], one of the important factors affecting the choice of reconstruction scheme of a gravity-type quay wall is the reactive capacity estimation of the soil base. The strength and the reactive capacity of soil bases of mentioned structures during the operation depend on operational load values.

Based on the above, the method of the reactive capacity calculation of the soil base has been developed [13, 14]. The method is based on the theory of limit stress state but compared to other approximate methods, considers two zones of stress state (limit and sublimit) and the friction on the

contact of the base of the foundation structure and the soil base. In the paper, concrete blocks quay wall with the immersed stone bed in the soil is considered. Here, the friction on the contact of the stone bed and the base of the foundation structure is taken into account (Fig. 1).

Where b_e – the width of the contact zone of the stone bed interacting with the base of the foundation structure in limit stress state; B – the width of the base of the foundation structure interacting with the stone bed; f_{fr}^{lim} – the intensity of the friction forces on the contact of base of the foundation structure within the width of limit stress state zone; f' – the intensity of the friction forces on the contact base of the foundation structure within the width of sublimit stress state zone; E – the lateral backfill pressure.

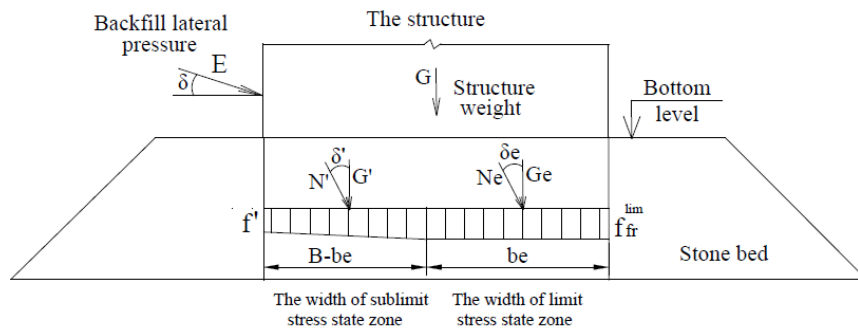


Fig. 1. The calculation scheme for determining the width of limit and sublimit stress state zones of the soil base

The resultant of the reactive capacity of the soil base N can be determined as the vector sum of two components: limit N_e acting within the wide b_e and sublimit N' acting within the wide $B - b_e$. In this case, the resultant of the reactive capacity of the soil base N can be expressed by the equation
$$N = [N_e^2 + N'^2 + 2 \cdot N_e \cdot N' \cdot \cos(\delta_e - \delta')]^{1/2}.$$

The design scheme for determination of the resultant of the reactive capacity of the soil base N is shown in Fig. 2. It should be noted that the equilibrium conditions of each zone of strain stress should be consistently considered for the determination of limit N_e and sublimit N' components of the reactive capacity of the soil base. The definition of all necessary components of the design scheme is described in the work [14].

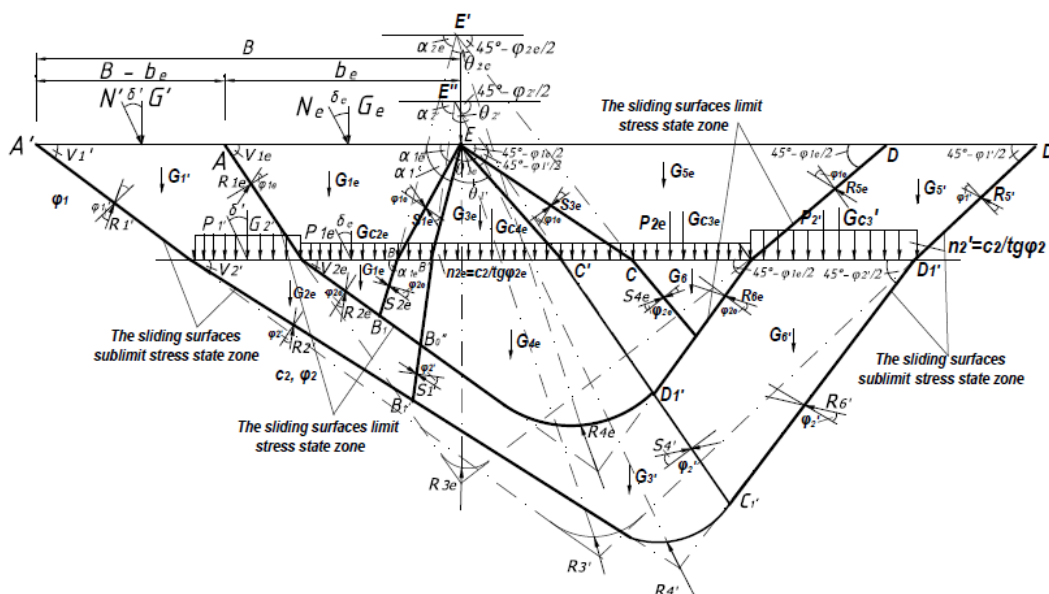


Fig. 2. The sliding surfaces and the outlines of limit and sublimit stress state zones

The cohesive soil characterized by specific cohesion c can be taken into consideration by loading of an uniformly distributed load acting downward on the top surface of the soil base. The intensity of the load within limit stress state $n2e = c2/tg\varphi2e$ the intensity of the load within sublimit stress state $n2' = c2/tg\varphi2$ as shown in Fig. 2. The angels δ' and δ_e , determine as $tg\delta' = E'/G'$ and $tg\delta_e = E_e/G_e$ where E_e, G_e and E', G' horizontal and vertical components of the resultants N_e and N' accordingly in the range of limit and sublimit stress state zones.

There are two phases of the interaction of a gravity-type quay wall and the backfill. First is the phase of structure construction. It includes the process of formation of the backfill. Second, is the operation phase. The paper studies the second phase. In this case, the growth of a uniformly distributed load q leads to an increase of the lateral backfill pressure and a decrease of the reactive capacity of the soil base (due to the appearance and development of limit stress zone in the soil base). This process will continue until the reactive capacity of the soil base does not reach of limit value. Further increase of load q will lead to loss of stability of the structure due to the exhaustion of the bearing capacity of the soil base.

This paper reviews the results of reactive capacity calculation of the soil base of some gravity berthing structures for the choice of the reconstruction scheme and determination of operational loads. The design of the reconstructed gravity-type quay wall is shown in Fig. 3. The quay wall comprises four courses of concrete blocks on a stone bed and a superstructure made of reinforced concrete elements of an L-shaped type. The backfill material – stone and gravel filter.

The reconstruction scheme of the berth has been chosen based on the reactive capacity of the soil base calculation of the existing berth. The reconstruction of the existing berth provides the construction of a new high pile grillage structure on the seaward side and carrying out dredging works.

A high pile grillage with steel sheet pile wall and back steel pipe piles is shown in Fig. 3. The wall and steel pipes are rigidly embedded in the grillage. The grillage is a monolithic reinforced concrete element. The front crane rail is designed on a pile foundation and consists of one row of vertical and inclined steel pipe piles. The rear crane rail is laid along a reinforced concrete beam on piles.

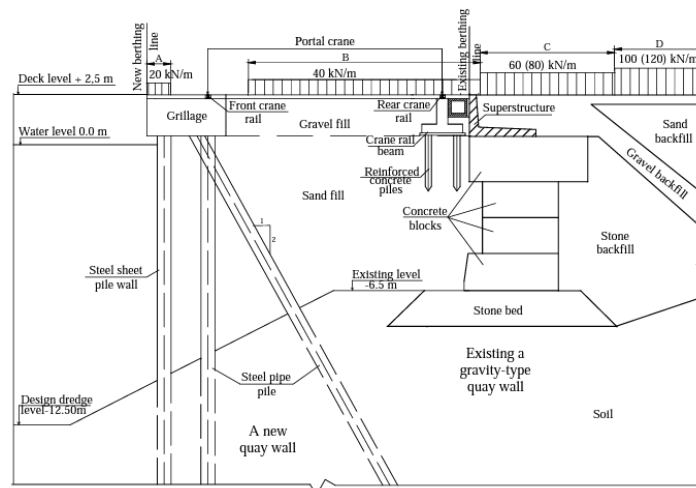


Fig. 3. Cross – section of reconstructed berth

The reactive capacity calculation of the soil base of concrete block quay walls by two methods (the traditional method accordingly [1, 2] and the proposed method described above [13, 14]) have been performed. The calculations have shown that the value of the reactive capacity of the soil base obtained by the proposed method is 1.35 times greater than the value obtained by the traditional method. It allowed increasing the uniformly distributed load intensity in the rear zone of the berth: in zone C from 60 to 80 kN/m² and in zone D from 100 to 120 kN/m². The scheme of operational loads is shown in Fig. 3.

Berths 24 and 21 of Odessa Commercial Sea Port are considered. Cross-sections of berths are shown in Fig. 4, 5. The berth design is an open-piled quay wall with a concrete block gravity wall

on the coastward side. The reactive capacity calculation of the soil base of a concrete block gravity wall made it possible to clarify the values of operational loads on the berthing structures. The reactive capacity of the soil base has been calculated by the methods described above.

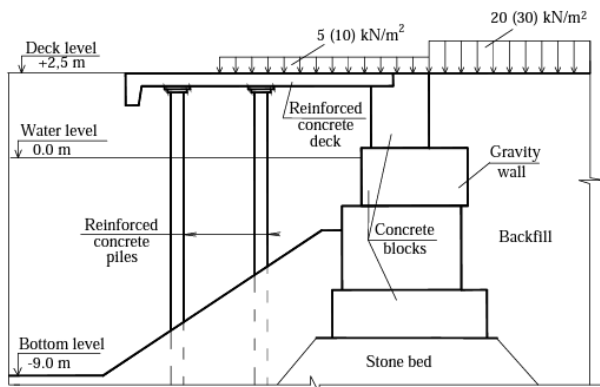


Fig. 4. Cross-sections of Berth 24

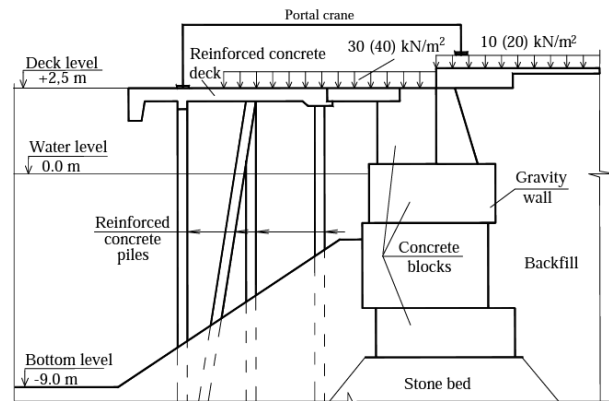


Fig. 5. Cross-sections of Berth 21

For berth 24, the calculations have shown that the value of the reactive capacity of the soil base obtained by the proposed method is 1.36 times greater than the value obtained by the traditional method. It allowed increasing the uniformly distributed load intensity within the superstructure of an open-piled quay wall from 5 to 10 kN/m², behind a concrete block gravity wall from 20 to 30 kN/m².

For berth 21, the calculations have shown that the value of the reactive capacity of the soil base obtained by the proposed method is 1.42 times greater than the value obtained by the traditional method. It allowed increasing the uniformly distributed load intensity within the superstructure of an open-piled quay wall from 30 to 40 kN/m², behind a concrete block gravity wall from 10 to 20 kN/m².

Conclusions. The development of foreign trade and the export orientation of strategic sectors of the Ukrainian economy lead to the development of maritime transport infrastructure. The rational direction for its development is the construction of new ports and cargo terminals, as well as the reconstruction of existing ones. The results of the research have been used to evaluate the developed method for the reactive capacity calculation of the soil base of a gravity-type quay wall for particular operating conditions. The most important conclusions are:

1. For the selection of a reconstruction scheme of gravity-type quay walls, it is necessary to evaluate its actual technical condition, considering the results of the reactive capacity calculation of the soil base. The safe operation and the durability of the operated berthing structures depend on the values of the operational loads.
2. The method of the reactive capacity calculation of the soil base of a gravity-type quay wall is proposed. The method is based on the theory of limit stress state but compared to other approximate methods, considers two zones of stress state (limit and sublimit) and the friction on the contact of the base of the foundation structure and the soil base.
3. The application of the proposed method for the reactive capacity calculation of the soil base of gravity-type quay walls made it possible to consider reconstruction schemes and clarify permissible operational loads.
4. The calculation results can be used for the assessment of the bearing capacity reserves of operated berthing structures.

References

- [1] P.I. Yakovlev, *Vzaimodeistvie sooruzhenii s gruntom*. M.: Nedra, 1997.
- [2] DBN B.2.1-10:2018. *Osnovaniya i fundamenty zdaniy i sooruzhenii*. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and housing and communal services of Ukraine, 2019.
- [3] M.V. Malyshev, "Razvitie oblastey predel'nogo sostoyaniya grunta v osnovanii kvadratnogo shtampa", *Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov*, no. 2, pp. 15-17, 1991.
- [4] P.I. Yakovlev, "O nekotorykh rezul'tatakh eksperimental'nykh issledovaniy vzaimodeystviya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy s gruntom", *Sbornik nauchnykh trudov: Gidrotekhnicheskie Sooruzheniya*, pp. 134 – 140, 1989.
- [5] S.G. Kushner, "O kontseptual'nom podkhode k raschetam osnovaniy sooruzheniy po predel'nym sostoyaniyam", *Zhurnal Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov*, no. 1, pp. 4 – 10, 2002.
- [6] Yu.K. Zaretskiy, "O nesushchey sposobnosti peschanykh osnovaniy fundamentov", *Zhurnal Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov*, no. 3, pp. 2 – 8, 2006.
- [7] V.G. Fedorovskii, "Correction term for Terzaghi's equation for calculating the bearing capacity of foundation beds", *Bases, Foundations and Soil Mechanics Journal*, no. 6, pp. 2 – 5, 2016.
- [8] N.K. Ameta, "Bearing Capacity Of Foundation-Review Paper", *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 6, no. 7, pp. 42 – 45, 2017. ISSN: 2320-0847.
- [9] J.M. Raut, S.R. Khadeshwar, K.V. Madurwar, "Bearing Capacity of Foundation: Review", *International Journal of Creative Research Thoughts*, vol. 8, no. 10, pp. 62 – 66, 2020. ISSN: 2320-2882.
- [10] Y. Guang-hua, J. Yan, Z. Yu-cheng, "New method for determination of bearing capacity of soil foundation", *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, no. 36(4), pp. 597 – 603, 2014. DOI:10.11779/CJGE201404001.
- [11] A.M. Karaulov, K.V. Korolev, A.O. Kuznetsov, "Bearing Capacity Assessment of Soil Foundation", *Soil Mechanics and Foundation Engineering Journal*, no. 59, pp. 111–118, 2022. DOI:10.1007/s11204-022-09790-y.
- [12] M. Okamura, T. Kimura, J. Takemura, "Bearing Capacity Predictions of Sand Overlying Clay Based on Limit Equilibrium Methods", *Soils and Foundations*, vol. 38, no. 1, pp. 181–194, 1998.
- [13] N. Khoneliia, K. Fedorova, "Improved methods of calculating of gravity - type structures", *German International Journal of Modern Science*, vol. 1, no. 19, pp. 59 – 62, 2021. DOI: 10.24412/2701-8369-2021-19-1-59-62.
- [14] N. Khoneliia, S. Bugaeva, "The reactive capacity of the soil bases of gravity-type quay wall", *The journal "World Science"*, vol. 1, no. 9(49), pp. 16 – 19, 2019. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30092019/6696. ISSN 2413-1032.
- [15] RD 31.31.38 – 86. *Instrukcija z posylennja i rekonstrukciji pryhaljnykh sporud*. M.: Mortekhinformreklama», 1986.

**РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ
ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРИЧАЛЬНІ СПОРУДИ
ГРАВІТАЦІЙНОГО ТИПУ**

¹Хонелія Н.Н., к.т.н., доцент,
khoneliantela@gmail.com, ORCID: 0009-0000-4323-0293

¹Лопатін К.О., аспірант,
SLodessa80@gmail.com, ORCID: 0009-0002-0794-8366
Одеський національний морський університет
вул. Мечникова, 34, Одеса, 65029, Україна

Анотація. Аналіз особливостей причального фронту морських портів України свідчить про застосування, головним чином, споруд які зведені, в основному, у період після Другої світової війни. При цьому найпоширенішими конструктивними рішеннями були пальові естакади, включаючи облямівки і больверки зі шпунта. Однак є споруди гравітаційного типу, які були побудовані в минулому та потребують модернізації й реконструкції. Частка у загальному причальному фронті таких споруд складає приблизно 10%. Більшість таких причальних конструкцій мають дефекти бетону та арматури, що знижує довговічність і несучу здатність. Крім того, розвиток вантажних і пасажирських морських перевезень та будівництво сучасних суден призвели до необхідності збільшення глибин біля причалів і визначення експлуатаційних навантажень, що відповідають сучасним вимогам. Важливими й актуальними напрямками подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення і розвиток причального фронту морських портів України, є розробка і впровадження в практику портового гідротехнічного будівництва вдосконалених методів проектування, будівництва і реконструкції традиційних конструкцій причальних споруд.

Вибір методу реконструкції залежить від правильної оцінки фактичного технічного стану реконструйованої споруди. Для забезпечення міцності та стійкості споруд гравітаційного типу важливим є розрахунок відпорної здатності ґрунтових основ. Пропонується розрахункова модель «споруда – ґрунтова основа». На основі цієї моделі розроблено метод розрахунку відпорної здатності ґрунтових основ причальних споруд гравітаційного типу. Цей метод дозволяє визначити відпорну здатність ґрунтової основи у рамках моделі змішаного напруженого стану (облік граничного та дограничного напруженого стану ґрунту основи).

Розглядаються деякі результати застосування запропонованого методу для оцінки відпорної здатності ґрунтової основи причальних стінок гравітаційного типу. Отримані результати використані для аналізу попередніх варіантів реконструкції та уточнення експлуатаційних навантажень.

Ключові слова: відпорна здатність, ґрунтова основа, споруда гравітаційного типу, граничний та дограничний напружено-деформований стан, реконструкція, експлуатаційні навантаження.

Стаття надійшла до редакції 12.11.2023

**МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗВЕДЕННЯ
ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ «АВІНЬЙОН»**

¹**Руссий В.В.**, доктор філософії,
viruswot@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5884-2097

¹**Бочевар К.І.**, здобувач,
4871416k@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4589-8080,

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

Анотація. Стаття присвячена моделюванню показників ефективності комплексного процесу зведення житлового комплексу «Авіньйон» з використанням незнімної опалубки. Моделювання показників відбувалось за допомогою використання сучасних програмних комплексів при варіюванні факторів, що на них впливають з урахуванням діючих обмежень. Під час моделювання у якості складової комплексного процесу зведення будівлі використовувалось наступне рішення зі зведення стін – встановлення легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК) з обшиванням незнімною опалубкою та наповненням пінополістиролбетоном. В попередніх досліджень встановлено, що це конструктивно-технологічне рішення є найбільш ефективним з порівнюваних.

Грунтуючись на попередніх дослідженнях виконано експериментально-статистичне моделювання показників «тривалість будівництва», «вартість будівництва», «середня інтенсивність фінансування» та «максимальна інтенсивність фінансування» при варіюванні змінних факторів: «коефіцієнт суміщеності процесів» та «кількість робочих годин на тиждень». Моделювання відбувалось за допомогою програмного комплексу COMPEX. Значення показників ефективності отримані згідно обраних планів експериментів за допомогою побудови економічних (кошторисні розрахунки) та організаційно-технологічних (графіки виконання робіт) моделей відповідно в програмних комплексах АВК 5 та Microsoft Project.

Під час проведення експериментально-статистичного моделювання визначено екстремуми показників ефективності та відповідні значення поєднань факторів, що на них впливають. Визначено характер та ступінь впливу факторів на досліджувані показники ефективності.

На показник «вартість будівництва» накладено діюче обмеження у вигляді використання кредитних коштів. Розрахунок впливу накладення діючого обмеження виконувався в програмному комплексі Microsoft Excel. При варіювання факторного простору побудовано діаграми зміни вартості зведення будівлі та розміру коштів, необхідних на забезпечення відсотків по кредиту. При суміщенні (сумуванні) цих діаграм побудовано значення показнику вартості будівництва з урахуванням впливу відсоткової ставки кредитних коштів. Визначено, що при використанні кредитних коштів в обсязі 90 % за рахунок відсотків тіла кредиту значно підвищується вартість зведення будівлі. В середньому це підвищення становило 183,8 млн. грн.

Побудова графічних залежностей виконувались в програмному комплексі CorelDraw X6.

Ключові слова: конструктивні та організаційно-технологічні рішення, стінові конструкції, незнімна опалубка, експериментально-статистичне моделювання.

Вступ. Будівлі, основна частина яких виготовлена з монолітного залізобетону показали себе найбільш стійкими під час дії позапроєктних впливів, що викликані воєнними діями. За цими технологіями активно зводять будівлі в усьому світі. Ці технології мають свої недоліки. Наприклад, необхідність розбирання опалубки, встановлення розгалужених

сплетінь арматури вручну тощо. Це призводить до збільшення трудомісткості, тривалості зведення та вартості. В багатоповерхових будівлях зведення монолітних залізобетонних елементів має зазвичай вирішальний вплив на показники ефективності будівництва. Крім цього, актуальною та розповсюдженою проблемою є недостатність наявності власних коштів для зведення будівлі. Нерідко доводиться залучати кредитні кошти. Тому, слід розглянути які більш ефективні рішення (конструктивні та організаційно-технологічні) можливо використовувати при зведенні монолітних залізобетонних елементів.

Одним з актуальних напрямків є дослідження показників ефективності зведення будівель з влаштуванням стін у незнімній опалубці, у вигляді блоків, панелей тощо. Це дозволяє влаштовувати стіни відразу з внутрішнім оздобленням (наприклад, гіпсокартонні листи) та зовнішнім оздобленням (наприклад, скломагнієві або цементно-стружкові плити). При цьому вони виконують ще й роль несучих елементів та є ефективнішими ніж традиційні технології бетонування.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. В останніх дослідженнях був виконаний пошук відомих конструктивно-технологічних рішень для зведення стін з використанням незнімної опалубки [1]. Розроблено конструктивно-технологічне рішення та отримано патент на корисну модель (UA № 149402 «Стіна будівлі») [2]. Це рішення включає в себе внутрішній і зовнішній огорожуючі шари. Між цими шарами встановлюються легкі сталеві тонкостінні конструкції (ЛСТК) та виконується заповнення з пінополістиролбетону [2].

В роботі [1] виконано аналіз ефективності застосування відомих та розробленого конструктивно-технологічних рішень для зведення стін з використанням незнімної опалубки. Визначення ефективності застосування рішень виконувалось за допомогою методики багатокритеріального аналізу [3-6] по кількісним та якісним критеріям. За результатами аналізу найбільш ефективним рішенням для зведення стін у незнімній опалубці є конструктивно-технологічне рішення, виконане за запатентованою технологією [2].

В роботі [7] наведено результати досліджень фізико-механічних параметрів нового розробленого конструктивно-технологічного рішення – стіни з пінополістиролбетону в незнімній опалубці з використанням легких сталевих тонкостінних конструкцій. А саме, проведено експериментальні дослідження: з визначення терміну ефективної теплової експлуатації стіни; впливу циклічних змін температури на теплопровідність основного матеріалу, що ізолює – пінополістиролбетону. Проведено акустичні випробування стіни.

Визначено методику, за якою слід визначати характер зміни показників ефективності в залежності від факторів, що на них впливають – експериментально-статистичне моделювання (ЕСМ) [8-15]. Проведено моделювання, визначено графічні й аналітичні залежності зміни показнику «рентабельність будівництва» при варіюванні досліджуваних факторів: «коефіцієнт суміщеності процесів» та «кількість робочих годин на тиждень». Визначено, що при застосуванні максимальних значень обраних показників можливо отримати найбільш ефективний показник рентабельності. Отримано значення показників «вартість будівництва» та «тривалість будівництва» [16].

Постановка мети та завдання. Мета дослідження – визначити значення та характер зміни показників ефективності при варіюванні факторного простору та впливі діючих обмежень будівельного виробництва.

Для досягнення поставленої мети вирішено наступні завдання:

1. Проведено експериментально-статистичне моделювання зміни показників ефективності при варіюванні факторів «коефіцієнт суміщеності процесів» та «кількість робочих годин на тиждень».

2. На показник «вартість будівництва» накладено діюче обмеження у вигляді використання 90 % кредитних коштів.

3. Розраховано значення показнику «вартість будівництва» з урахуванням впливу відсотку забезпечення тіла кредиту та визначено характер впливу факторів під час їх варіювання.

Матеріали та методи дослідження. Побудова економічних та організаційно-технологічних моделей виконувалась за допомогою програмних комплексів АВК 5 та Microsoft Project.

Експериментально-статистичне моделювання виконувалось в програмному комплексі COMPEX. Моделювання здійснювалось з використанням теорії планування експерименту на основі обраних планів експериментів.

Розрахунок впливу накладення діючого обмеження (урахування впливу відсотку забезпечення тіла кредиту на показник ефективності «вартість будівництва») та побудова графічних залежностей виконувались в програмних комплексах Microsoft Excel та CorelDraw X6.

Основний матеріал і результати. В продовження попередніх досліджень [1, 2, 7, 16] зведення стін будівель, що виконані з легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК) заповнених пінополістиролбетоном та оздоблених елементами незнімної опалубки на прикладі житлового комплексу «Авіньйон» виконано наступне.

На основі раніше побудованих моделей в АВК 5 та Microsoft Project визначено значення показників середньої та максимальної інтенсивності фінансування (табл. 1) при варіюванні факторів, що на них впливають.

При розрахунку показників інтенсивності фінансування враховувався параметр «загальновиробничі витрати». Він прямо залежить від зміни обраних факторів експерименту і тривалості будівництва. Даний параметр у відсотковому співвідношенні має частку 8-12 % від загальної суми будівництва та вносився в побудовані організаційно-технологічні моделі (графіки виконання робіт) в програмному комплексі Microsoft Project.

Таблиця 1 – Значення показників інтенсивності фінансування при варіюванні факторного простору

№ точки	X ₁ Коефіцієнт суміщеності процесів, %	X ₂ Кількість робочих годин на тиждень, год.	X ₁ Коефіцієнт суміщеності процесів	X ₂ Кількість робочих годин на тиждень	Середня інтенсивність фінансування, грн/міс.	Максимальна інтенсивність фінансування, грн/міс.
1	74,61	40	-1	-1	16 315461	17 326 977
2	79,91	40	0	-1	20 490423	21 997 942
3	85,21	40	1	-1	27 804320	32 802 940
4	74,61	60	-1	0	20 306388	23 381 562
5	79,91	60	0	0	25 583 10	29 271 008
6	85,21	60	1	0	34 636866	42 895 910
7	74,61	80	-1	1	32 342760	33 193 655
8	79,91	80	0	1	40 693255	43 627 268
9	85,21	80	1	1	56 744422	61 172 774

На основі значень, визначених в [16] та в таблиці 1 проведено експериментально-статистичне моделювання в програмному комплексі COMPEX. Встановлено характер зміни показників ефективності «вартість будівництва», «тривалість будівництва», «середня інтенсивність фінансування» та «максимальна інтенсивність фінансування» при варіюванні факторів «коефіцієнт суміщеності процесів» та «кількість робочих годин на тиждень».

В зоні значень мінімуму показника «тривалість будівництва» фактори мають суттєвий вплив – 73 та 100 %. Значно більший вплив має фактор «кількість робочих годин на тиждень» (рис. 1).

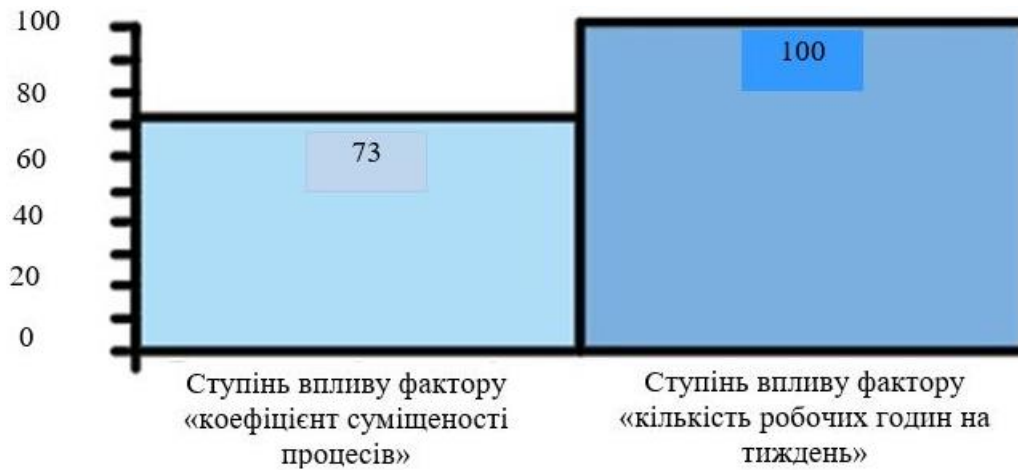


Рис. 1. Рівень впливу факторів «коефіцієнт суміщеності процесів» та «кількість робочих годин на тиждень» у зоні мінімуму показника «тривалість будівництва»

З рисунку 2 видно, що при збільшенні значень факторів «коефіцієнт суміщеності процесів» та «кількість робочих годин на тиждень» показник «тривалість будівництва» зменшується.

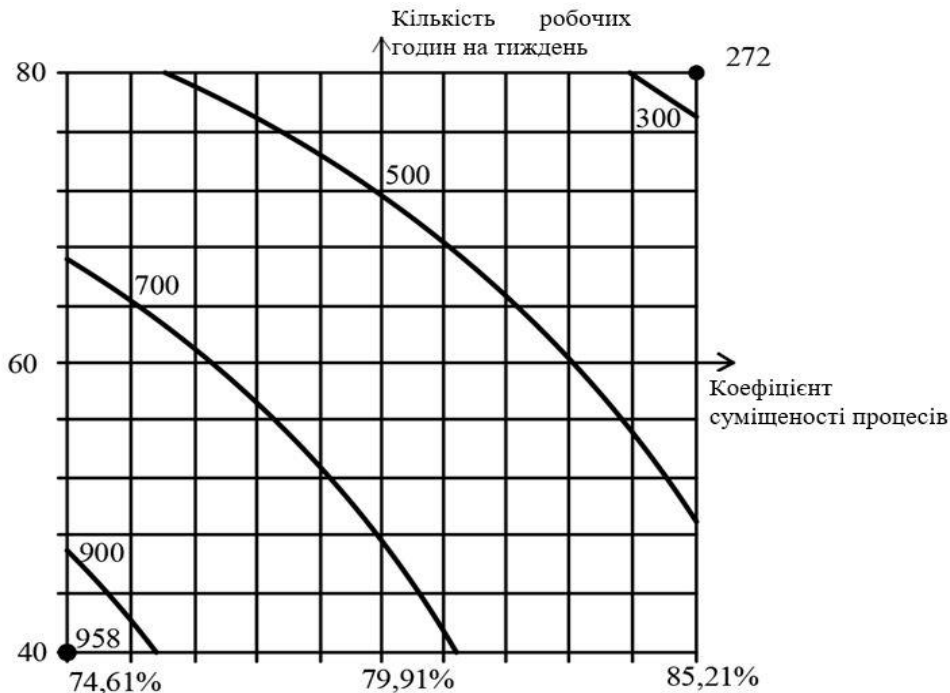


Рис. 2. Ізолінії значень показника «тривалість будівництва» при варіюванні факторів «коефіцієнт суміщеності процесів» та «кількість робочих годин на тиждень»

Екстремуми функції показника «тривалість будівництва» наступні:

$$Y_{\max} = 958 \text{ днів } (X_1 = 40 \text{ години на тиждень; } X_2 = 74,61\%);$$

$$Y_{\min} = 272 \text{ днів } (X_1 = 80 \text{ годин на тиждень; } X_2 = 85,21\%).$$

В зоні значень мінімуму показників «середня інтенсивність фінансування» (рис. 3, а) та «максимальна інтенсивність фінансування» (рис. 3, б) фактори мають суттєвий вплив. Значно більший вплив має фактор «кількість робочих годин на тиждень» (100 %). Фактор «коефіцієнт суміщеності процесів» має менший порівняно менший вплив (77 та 81 %).



Рис. 3. Рівень впливу факторів «коефіцієнт суміщеності процесів» та «кількість робочих годин на тиждень» у зоні мінімуму показників «середня інтенсивність фінансування» (а) та «максимальна інтенсивність фінансування» (б)

При збільшенні значень факторів «коефіцієнт суміщеності процесів» та «кількість робочих годин на тиждень» показники «середня інтенсивність фінансування» та «максимальна інтенсивність фінансування» збільшуються (рис. 4, а, б).

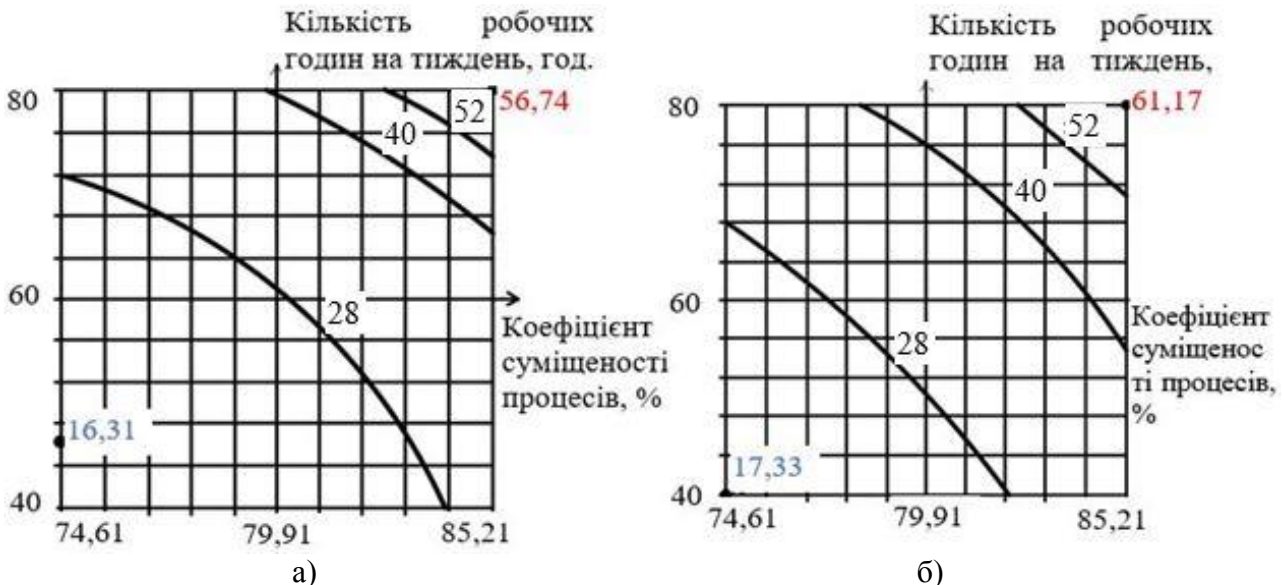


Рис. 4. Ізолінії значень показників інтенсивності фінансування при варіюванні факторів «коефіцієнт суміщеності процесів» та «кількість робочих годин на тиждень»: а – показника «середня інтенсивність фінансування»; б – показника «максимальна інтенсивність фінансування»

Екстремуми функції відповідно показників «середня інтенсивність фінансування» та «максимальна інтенсивність фінансування» досягають в таких точках:

$$Y_{\max} = 56,74 \text{ млн. грн в місяць } (X_1=80 \text{ год.}; X_2=85,21\%);$$

$$Y_{\max} = 61,17 \text{ млн. грн в місяць } (X_1=80 \text{ год.}; X_2=85,21\%);$$

$$Y_{\min} = 16,31 \text{ млн. грн в місяць } (X_1 = 40 \text{ год.}; X_2 = 85,21\%);$$

$$Y_{\min} = 17,33 \text{ млн. грн в місяць } (X_1 = 40 \text{ год.}; X_2 = 85,21\%).$$

В попередніх дослідженнях [16] було розраховано значення показника «вартість будівництва». Однак в сучасному будівництві не можливо завжди покладатись на використання лише власних коштів. Тому прийнято обмеження – необхідність сплати відсотків за кредитними коштами. Прийнято, що у складовій «вартість будівництва» буде наявно 10 % власних коштів підприємства та 90 % кредитних. При цьому кредитний відсоток встановлений зі ставкою 10% річних та 1% комісії банку за щомісячне внесення кредитних рахунків. З урахування введеного

обмеження визначено значення показника «вартість будівництва з урахуванням кредитних коштів» (табл. 2).

Таблиця 2 – Значення показника «вартість будівництва з урахуванням кредитних коштів» при варіюванні факторного простору

Поєднання значень факторів	Показник «вартість будівництва з урахуванням кредитних коштів», грн
X ₁ Коефіцієнт суміщеності процесів – 85,21 % X ₂ Кількість робочих годин на тиждень – 40 год.	701 228 568
X ₁ Коефіцієнт суміщеності процесів – 85,21 % X ₂ Кількість робочих годин на тиждень – 60 год.	653 943 477
X ₁ Коефіцієнт суміщеності процесів – 85,21 % X ₂ Кількість робочих годин на тиждень – 80 год.	632 484 949
X ₁ Коефіцієнт суміщеності процесів – 79,91 % X ₂ Кількість робочих годин на тиждень – 40 год.	750 449 255
X ₁ Коефіцієнт суміщеності процесів – 79,91 % X ₂ Кількість робочих годин на тиждень – 60 год.	695 581 554
X ₁ Коефіцієнт суміщеності процесів – 79,91 % X ₂ Кількість робочих годин на тиждень – 80 год.	656 323 882
X ₁ Коефіцієнт суміщеності процесів – 74,61 % X ₂ Кількість робочих годин на тиждень – 40 год.	805 268 383
X ₁ Коефіцієнт суміщеності процесів – 74,61 % X ₂ Кількість робочих годин на тиждень – 60 год.	724 793 581
X ₁ Коефіцієнт суміщеності процесів – 74,61 % X ₂ Кількість робочих годин на тиждень – 80 год.	690 900 186

З графіку (рис. 5) видно, що при необхідності сплати відсотків за кредитом (синій колір) значно збільшує вартість (зелений колір) зведення будівлі при використанні стінових конструкцій з незнімною опалубкою. В результаті введення діючого обмеження отримуємо підвищені значення показника «вартість будівництва з урахуванням кредитних коштів» (табл. 2, рис. 5). Це підвищення становить в середньому 183,8 млн грн.

Мінімальне значення показника «вартість будівництва з урахуванням кредитних коштів» склало $Y_{\min} = 632,49$ млн. При цьому значення факторів становили: «коефіцієнт суміщеності процесів» – 85,21 %, «кількість робочих годин на тиждень» – 80 год.

Максимальне значення показника «вартість будівництва з урахуванням кредитних коштів» склало $Y_{\max} = 805,27$ млн. При цьому значення факторів становили: «коефіцієнт суміщеності процесів» – 74,61 %, «кількість робочих годин на тиждень» – 40 год.

Якщо проаналізувати мінімальні та максимальні значення показника «вартість будівництва з урахуванням кредитних коштів» можливо зробити наступний висновок. Чим більшою є тривалість зведення будівлі, а відповідно – чим меншими є значення факторів «коефіцієнт суміщеності процесів» та «кількість робочих годин на тиждень» тим більший вплив здійснюється на підвищення вартості зведення будівлі при влаштуванні стін з незнімної опалубки.

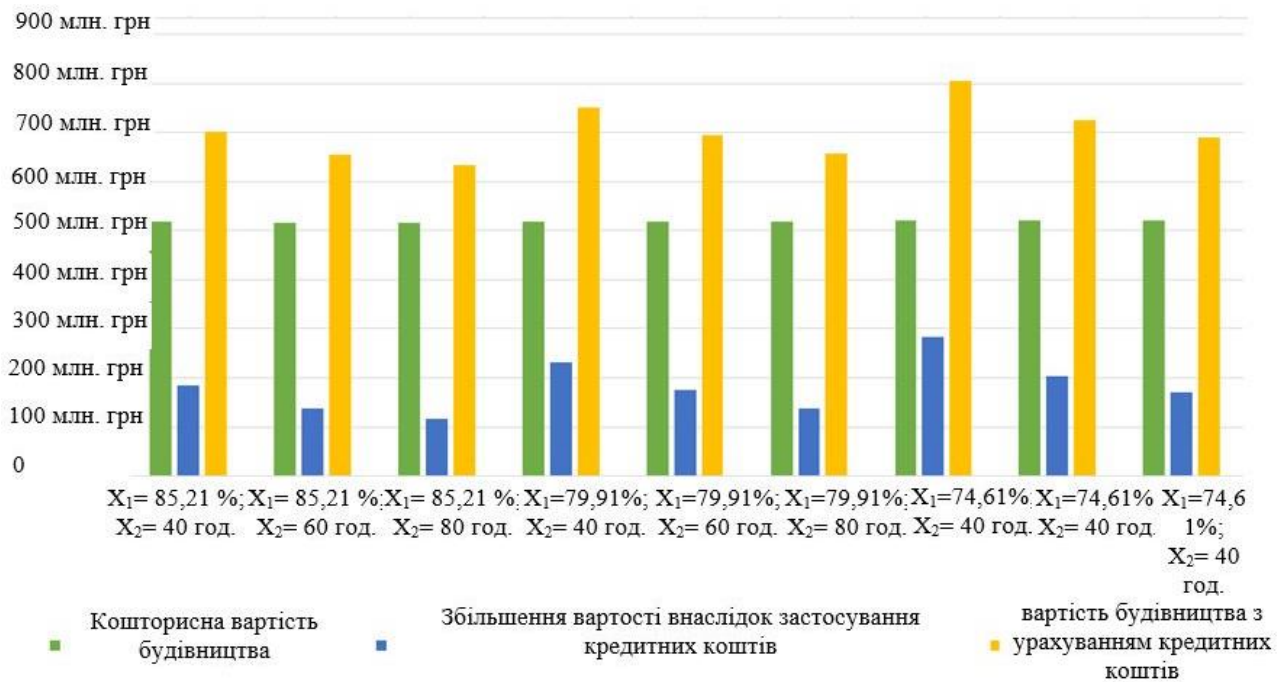


Рис. 5. Діаграма зміни вартості будівництва при варіюванні факторного простору з введенням обмеження (використанням кредитних коштів)

Висновки:

1. Експериментально-статистичне моделювання процесу зведення житлового комплексу «Авіньйон» з використанням стін в незнімній опалубці, яке виконано у програмному комплексі COMPEX дозволило виявити, що у встановлених межах варіювання факторів «коефіцієнт суміщеності процесів» та «кількість робочих годин на тиждень» значення показників ефективності можуть змінюватись наступним чином:

- «тривалість будівництва» $Y = 272 \dots 958$ днів;
- «середня інтенсивність фінансування» $Y = 16,31 \dots 56,74$ млн. грн/міс.;
- «максимальна інтенсивність фінансування» $Y = 17,33 \dots 61,17$ млн. грн/міс.;
- «вартість будівництва з урахуванням кредитних коштів» $Y = 632,49 \dots 805,27$ млн. грн.

2. Проведене моделювання дозволило визначити характер та ступінь впливу зміни значень факторного простору на досліджувані показники ефективності.

3. Накладення діючого обмеження на показник «вартість будівництва» у вигляді використання 90 % кредитних коштів (необхідності забезпечення виплати відсотків за тілом кредиту) дозволило виявити середнє підвищення вартості, що складає 183,8 млн. грн. А також характер впливу цього підвищення при варіюванні факторного простору на показник «вартість будівництва з урахуванням кредитних коштів».

4. Результати досліджень дозволили визначити перспективні напрямки подальшої наукової роботи у сфері дослідження комплексного процесу зведення будівель з використанням незнімної опалубки.

Перспективні напрямки подальших досліджень. Отримані результати досліджень дозволяють визначити напрямки подальшої наукової роботи у сфері дослідження комплексного процесу зведення будівель з використанням незнімної опалубки.

Виділено наступні напрямки подальших досліджень.

1. Розробка нових та вдосконалення існуючих конструктивно-технологічних рішень зведення вертикальних елементів будівель з використанням незнімної опалубки.

2. Дослідження показників ефективності зведення інших об'єктів та збільшення спектру досліджуваних показників.

3. Продовження діяльності з впровадження результатів досліджень в освітній процес, наукову роботу та будівельне виробництво.

Література

1. Meneilyuk O.I., Kyryliuk S.V., Bochevar K.I. Evaluation of the new constructive-technological solution of the fence structure in the non-removable formwork. *Modern construction and architecture*. 2022. № 2. P. 113-122.
2. Стіна будівлі: пат. 149402 Україна : E04C 2/00; E04C 2/292. № у 2021 00397 ; заявл. 02.02.2021 ; опубл. 17.11.2021, Бюл. № 46. 6 с.
3. Оптимизация организационно-технологических решений реконструкции высотных инженерных сооружений / А. И. Меньлюк, М. Н. Ершов, А. Л. Никифоров, И. А. Меньлюк. К.: ТОВ НВП «Інтерсервіс», 2016. 332 с.
4. Volkmann G., Schubert W. Optimization of Excavation and Support in Pipe Roof Supported Tunnel Sections. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2006. № 21 (3-4). P. 404–404.
5. Meneilyuk O., Nikiforov A., Meneilyuk I. Transport construction cost management by rational organizational and technological solutions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies This link is disabled*. 2020. № 3 (3-105). P. 16–24.
6. Meneilyuk, A., Nikiforov, A. Knowledge management by construction management template for sustainable entrepreneurship. *Organization, Technology and Management in Construction*. 2022. № 14 (1). P. 2601–2615.
7. Meneilyuk O., Bochevar K., Nikiforov O. Long-term thermal productivity of polystyrene concrete in a new composite wall in a fixed formwork. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. №3 (195). P. 66–74.
8. Вознесенский В. А., Ляшенко Т. В., Огарков Б. Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. К.: Вища шк., 1989. 328 с.
9. Ковальов В. В., Данилова Т. В., Єпіфанцева С. В. Систематизація організаційно-технологічних та інших факторів, які впливають на вартість будівництва об'єктів, з урахуванням вимог щодо їх енергоефективності і екологічності. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 6. С. 57–64.
10. Rassouli B., Soheil Shafaei S., Ayazi A., Farahbod F. Experimental and numerical study on steel-concrete composite shear wall using light-weight concrete. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. № 126. P. 117–128.
11. Ahmed S.N.A., David N.C. Numerical modelling of tunnel face stability in homogeneous and layered softground. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019. № 94. P. 103096.
12. Billaux, D., & Dedecker, F. Numerical rock modeling and fracturation: from continuous to discontinuous. *Revue Française de Géotechnique*. 2018. № 155, 2. P. 1–6.
13. Allen, T. T., Yu, L., and Schmitz, J. An Experimental Design Criterion for Minimizing Meta-Model Prediction Errors Applied to a Die Casting Process Design. *Applied Statistics*. 2003. 52. P. 103–117.
14. Арутюнян І.А., Коваленко М.Г. Детерміновані та недетерміновані фактори, що впливають на вихідні умови задач оптимізаційно-організаційних процесів будівельного виробництва. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2020. № 43. С. 59-66.
15. Carlyle, W. M., Montgomery, D. C., and Runger, G. C. Optimization Problems and Methods in Quality Control and Improvement. *Journal of Quality Technology*. 2000. 31. P. 1–17.
16. Меньлюк О.І., Бочевар К.І., Маньківська Д.А. Зміни рентабельності будівництва житлового комплексу «Авіньйон» під впливом організаційних факторів. *Будівельне виробництво*. 2022. №74. С. 30-34.

References

- [1] O. Meneilyuk, S. Kyryliuk, K. Bochevar, "Evaluation of the new constructive-technological solution of the fence structure in the non-removable formwork", *Modern construction and architecture*, no. 2, pp. 113–122, 2022.
- [2] V. Mohilnikov, K. Bochevar, "Stina budivli", Ukrainian Institute of Intellectual Property UA 149402, November 17, 2021.
- [3] A. Meneiliuk, M. Ershov, A. Nykyforov, Y. Meneiliuk, *Optymyzatsyia orhanyzatsyonno-tekhnohycheskykh reshenyi rekonstruktsyy vusotnukh ynzhenernukh sooruzhenyi*. Kyiv, Ukraine: TOV NVP «Interservis», 2016.
- [4] G. Volkmann, W. Schubert, "Optimization of Excavation and Support in Pipe Roof Supported Tunnel Sections", *Tunnelling and Underground Space Technology*, no. 21 (3-4), pp. 404-404, 2006.
- [5] O. Meneilyuk, A. Nikiforov, I. Meneilyuk, "Transport construction cost management by rational organizational and technological solutions", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies This link is disabled*, no. 3 (3-105), pp. 16–24, 2020.
- [6] A. Meneiliuk, A. Nikiforov, "Knowledge management by construction management template for sustainable entrepreneurship", *Organization, Technology and Management in Construction*, no. 14 (1), pp. 2601–2615, 2022.
- [7] O. Meneilyuk, K. Bochevar, O. Nikiforov, "Long-term thermal productivity of polystyrene concrete in a new composite wall in a fixed formwork", *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 3 (195), pp. 66–74, 2023.
- [8] V. Voznesenskyi, T. Liashenko, B. Oharkov, *Chyslennue metodu reshenyia stroytelno-tekhnohycheskykh zadach na EVM*. Kyiv, Ukraine: Vyshcha shkhola, 1989.
- [9] V. Kovalov, T. Danylova, S. Yepifantseva, "Systematyzatsiia orhanizatsiino-tekhnohichnykh ta inshykh faktoriv, yaki vplyvaiut na vartist budivnytstva obektiv, z urakhuvanniam vymoh shchodo yikh enerhoefektyvnosti i ekolohichnosti", *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, no. 6, pp. 57–64, 2018.
- [10] B. Rassouli, S. Soheil Shafaei, A. Ayazi, F. Farahbod, "Experimental and numerical study on steel-concrete composite shear wall using light-weight concrete", *Journal of Constructional Steel Research*, no. 126, pp. 117-128, 2016.
- [11] S.N.A. Ahmed, N. David, "Numerical modelling of tunnel face stability in homogeneous and layered softground", *Tunnelling and Underground Space Technology*, no. 94, 2019.
- [12] D. Billiaux, F. Dedecker, "Numerical rock modeling and fracturation: from continuous to discontinuous", *Revue Française de Géotechnique*, no. 155 (2), 2018.
- [13] T. Allen, L. Yu, J. Schmitz, "An Experimental Design Criterion for Minimizing Meta-Model Prediction Errors Applied to a Die Casting Process Design", *Applied Statistics*, no. 52, pp. 103–117, 2003.
- [14] I. Arutiunian, M. Kovalenko, "Determinovani ta nedeterminovani faktory, shcho vplyvaiut na vykhidni umovy zadach optyimizatsiino-orhanizatsiinykh protsesiv budivelnoho vyrobnytstva", *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, no. 43, pp. 59-66, 2020.
- [15] W. Carlyle, D. Montgomery, G. Runger, "Optimization Problems and Methods in Quality Control and Improvement", *Journal of Quality Technology*, no. 31, pp. 1–17, 2000.
- [16] O. Meneiliuk, K. Bochevar, D. Mankivska, "Zminy rentabelnosti budivnytstva zhytloвого комплексу "Avinion" pid vplyvom orhanizatsiinykh faktoriv", *Budivnelne vyrobnytstvo*, no. 74. pp. 30-34, 2022.

**MODELING PERFORMANCE INDICATORS OF BUILDING CONSTRUCTION USING
NON-REMOVABLE FORMWORK**

¹**Russyi V.V.**, PhD,

viruswot@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5884-2097

¹**Bochevar K.I.**, PhD student,

4871416k@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4589-8080,

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

Abstract. This article is dedicated to modeling performance indicators of the comprehensive process of constructing a multi-story building while varying influencing factors, taking into account existing constraints, and utilizing modern software complexes. During the modeling process, the following solution for wall construction was employed as a component of the comprehensive building process: the installation of lightweight steel thin-walled structures (LSTW) with non-removable formwork cladding and filling with polystyrene concrete. Previous research has established that this construction and technological solution is the most effective among the compared alternatives.

Building upon prior investigations, experimental-statistical modeling of the «construction duration», «construction cost», «average intensity of funding», and «maximum intensity of funding» indicators was performed, varying factors such as the «overlap coefficient of processes» and «number of working hours per week». Modeling was conducted using the COMPEX software complex. The values of efficiency indicators were obtained according to selected experimental plans by constructing economic (budgetary calculations) and organizational-technological (work performance schedules) models using the AVK 5 and Microsoft Project software complexes, respectively.

During the experimental-statistical modeling, extremes of efficiency indicators and corresponding values of factor combinations influencing them were determined. The nature and degree of the factors' impact on the investigated efficiency indicators were identified.

The «construction cost» indicator was subjected to an existing constraint in the form of using credit funds. The calculation of the impact of imposing this existing constraint was performed in the Microsoft Excel software complex. While varying the factorial space, diagrams of changes in the budgetary cost of building construction and the amount of funds needed to secure the loan were constructed. Combining these diagrams resulted in values for the «construction cost with consideration of credit funds». It was determined that the use of credit funds at a level of 90% significantly increases the cost of building construction. On average, this increase amounted to 183,8 million UAH.

Graphical dependencies were constructed using the CorelDraw X6 software complex.

Keywords: constructive and organizational-technological solutions, wall structures, non-removable formwork, experimental-statistical modeling.

Стаття надійшла до редакції 5.11.2023

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 мети статті (постановка завдання);
- виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів;
- висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку у даному напрямку;
- список літератури.

Загальні вимоги до оформлення тексту

Статті подаються в електронному вигляді файлом Word 97 – 2003 в форматі .doc. Назва файлу має містити номер тематики публікації та прізвище першого автора (наприклад, 5 Іванов.doc).

Статті подаються українською чи англійською мовою і друкуються мовою оригіналу.

Текстова частина статті набирається на аркушах формату **A4** шрифтом **Times New Roman 12 пт** через одинарний інтервал, вирівнюється по ширині сторінки, поля по 2 см з усіх боків, абзацний відступ – 1,0 см. **Обсяг статті 7-16 повних сторінок разом з анотаціями.**

Структура статті:

- *індекс УДК* (вирівняно по лівому краю без абзацного відступу, прописний, напівжирний);
- *назва статті* (відцентрована, усі літери прописні, напівжирні, переноси не допускаються);
- *прізвище, ініціали всіх авторів, науковий ступінь, вчене звання* (вирівняно по правому краю, прізвище – напівжирний; ступінь і звання – рядковий);
- *повна назва вищого навчального закладу чи організації* (курсив, вирівняно по правому краю; якщо автори з різних навчальних закладів, то кожен автор з окремого рядка);

- *електрона пошта* (вирівняно по правому краю та поряд унікальний номер ORCID);
- *анотації до статті* (абзацний відступ, назва напівжирна, анотації пишуться двома мовами: українською і англійською).

Текст першої анотації пишеться мовою основного тексту статті та повинен бути **не менш як 1800 знаків**.

Текст другої анотації, якщо видання не є повністю англійськомовним, кожна публікація не англійською мовою супроводжується анотацією англійською мовою обсягом **не менш як 1800 знаків**. Якщо видання не є повністю українськомовним, кожна публікація не українською мовою супроводжується анотацією українською мовою обсягом **не менш як 1800 знаків**. Друга анотація розміщується в кінці статті після списку літератури на англійській мові.

Дві анотації повинні коротко повторювати структуру статті, що включає вступ, мету, методику, результати, висновок. Машинний переклад **не дозволяється**.

- *ключові слова* (міжрядковий інтервал не робиться, абзацний відступ, назва напівжирна, текст ключових слів не більше 6–8 слів).

Назва статі, прізвище і ініціали, науковий ступінь, вчене звання, місце роботи, анотація і ключові слова – повторюються українською та англійською мовами.

Між рядками з індексом УДК, назвою статі, прізвищем авторів, анотацією, основним текстом і переліком літератури, літературою на англійській мові та другою анотацією одинарний інтервал.

- *Основний текст статті*.

Структура основного тексту статті згідно з постановою ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 р. (Бюлетень ВАК України №1, 2003 р.) повинна мати такі необхідні елементи (*назви структурних елементів в тексті статті потрібно виділити напівжирно*):

- вступ (постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями);

– аналіз останніх джерел досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми (бажано, щоб це був аналіз останніх публікацій у фахових журналах) і на які опирається автор, виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття;

- постановка мети та завдання (формулювання мети та завдань досліджень);

– матеріали та методи дослідження (опис використаних матеріалів та методів дослідження проблеми, що розглядається у статті);

– основний матеріал і результати (виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів);

– висновки (наукова новизна, наукове та практичне значення результатів дослідження, перспективи подальших наукових розроблень);

– *література* (відцентрована, напівжирна; посилання в тексті подають у квадратних дужках [2]; список літератури наводиться відповідно порядку посилань у тексті згідно з ДСТУ 8302:2015 та записується в стовпчик; написання «Джерела інформації», «Перелік літератури» **не допускається**). Бібліографічний список наводиться мовою оригіналу та транслітерується. Кількість посилань на літературні джерела у статті повинно бути не менше 15 джерел. Особлива увага приділяється сучасним англійськомовним статтям, зокрема індексованих WoS або Scopus.

– *бібліографічний список (References)*. Для відтворення українських власних назв засобами англійської мови при перекладі публікації англійською мовою застосовується транслітерація. Найменування організацій та установ, що не перекладаються на англійську мову, також транслітеруються. Транслітерація прізвищ авторів виконується залежно від мови оригіналу джерела відповідно до вимог Постанови Кабінету Міністрів України від 27.01.2010 р. № 55 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею». Бібліографічний список повинен бути оформлений з використанням стилю *IEEE STYLE* згідно з «Міжнародним стилем цитування та посилання в наукових роботах», Київ, 2016.

Таблиці слід виконувати в редакторах Word без заливання. Кожна таблиця має бути надрукована з відповідним заголовком та нумерацією після першого посилання на неї.

Ширина таблиць не повинна перевищувати поля сторінки. Шрифт в таблиці повинен відповідати шрифту статті.

Формули мають бути виконані в редакторі формул *Equation 3.0* чи *MathType* з використанням тільки загальноприйнятих шрифтів (Times New Roman; Symbol). Кожна формула набирається як один об'єкт, нумерація формул арабськими цифрами справа в дужках вирівняна по ширині сторінки.

Рисунки (діаграми, фото), подаються у чорно-білому, кольоровому варіанті або у градаціях сірого кольору після першого посилання на них; мають бути згруповані та являти собою один графічний об'єкт; мати нумерацію та підпис позначення ось координат. Розміри підписів на рисунку повинні відповідати шрифту Times New Roman 12 пт.

Разом зі статтею подаються:

- відомості про автора (авторська довідка): прізвище, ім'я, по батькові (повністю); вчене звання, вчений ступінь; посада, місце роботи; контактні адреси й телефони; поштова адреса, на яку надсилати примірник збірника
- рецензія на статтю, якщо автором є аспірант без співавторів з вченим ступенем та вченим званням.

Статті, які не відповідають наведеним вимогам, до розгляду не приймаються.

Подані матеріали підлягають додатковому рецензуванню членами редколегії або провідними фахівцями за науковими напрямками, тому можуть бути повернені авторам на доопрацювання.

Остаточне рішення щодо публікації статті приймає редакційна колегія видання.

Відхилений оригінал не повертається.

Оплата здійснюється тільки після підтвердження прийняття статті до друку.

Вартість публікації статті **1100 грн.** Збірник виходить 4 рази на рік щоквартально, в кінці кожного кварталу. Статті необхідно надсилати до 1 числа останнього кварталу (наприклад, якщо збірник виходить в кінці червня, то статті приймаються до 1 червня). Але прийом статей може закінчитись раніше вказаного терміну, якщо буде набрано необхідну кількість сторінок.

Матеріали надсилати за адресою:

Редакція «Сучасне будівництво та архітектура»
Одеська державна академія будівництва та архітектури,
вул. Дідрихсона, 4
м. Одеса, 65029, Україна
Контактна особа: Антонюк Надія Романівна
тел. роб. (048) 70-00-608
e-mail: visnuk_odaba@ogasa.org.ua
Сайт збірника: <http://visnyk-odaba.org.ua/>

Платіжні реквізити:

Центр НТТМ по АБ, код **21028281**,
МФО **320478**, Р/р **UA 10320478000026009924861812** в ПАТ АБ «Укргазбанк»,
Призначення платежу: «Сучасне будівництво та архітектура, ПІБ першого автора»

Просимо після відправлення матеріалів обов'язково зателефонувати або зв'язатися електронною поштою, щоб упевнитися в отриманні матеріалів та рішенні редакційної колегії щодо публікації статті.

Наукове видання

СУЧАСНЕ БУДІВНИЦТВО ТА АРХІТЕКТУРА

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

**Випуск № 6
грудень 2023**

Головний редактор *Вировой В.М.*
Технічний редактор *Антонюк Н.Р.*

Підписано до друку 4.12.2023 р.
Формат 60×84/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Цифровий друк. Ум.-друк. арк. 15,8.
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