

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 № 15
березень 2026**

ОДЕСА 2026

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

Випуск № 15, березень 2026

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; технологій 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);

Клименко Є.В. – д-р техн. наук, проф., ОДАБА;

Кривенко П.В. – д-р техн. наук, проф., Науково-дослідний інститут в’язаних матеріалів ім. В.Д. Глуховського (за згодою);

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

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

Менейлюк О.І. – 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;

Czarnecki Lech – Professor, Instytut Techniki Budowlanej, ITB, Warsaw, Польша (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, Tос H 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, кафедра «Іноземних мов».

Рекомендовано до видання Вченою радою ОДАБА

Протокол № 7 від 26.02.2026 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)



[This work by](#) © 2026 by [Одеською державною академією будівництва та архітектури](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

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

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

ODESA STATE ACADEMY
OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

***MODERN CONSTRUCTION
AND ARCHITECTURE***

COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS

**Issue № 15
March 2026**

ODESA 2026

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

Issue № 15, March 2026

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 Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, since 2000.

Founder and publisher – Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture (OSACEA), Odesa.
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;

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

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

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

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

Menelyuk O.I. – D.Sc., Professor, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture;

Plugin 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, Odesa 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, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

Recommended for publication by the Academic Board of the OSACEA

Protocol № 7, 26 February, 2026.

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)



This work © 2026 by Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture is licensed under CC BY 4.0

ЗМІСТ

АРХІТЕКТУРА

Бусленко Г.Ю., Юденко О.І. Будинок клубу «Харчовик» у Києві: особливості і втрати первинного задуму.....	7
Кюнцлі Р.В., Степанюк А.В. Еволюція регулювання нормативності інклюзії просторового середовища: від параметричних вимог до сценарно-функціонального підходу.....	16
Мінченков Р.І. Роль штучного інтелекту в адаптивній архітектурі: моделювання, аналіз і оптимізація параметрів розумного будинку.....	24

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

Дубик О.М., Чернишова О.С., Осовський І.М., Кононенко Д.Ю. Визначення напружено-деформованого стану конструкції жорсткого покриття під'їзного шляху аеродрому.....	34
Іванейко М.М., Хміль Р.Є., Бліхарський З.Я. Підходи до розрахунку залізобетонних плит, підсилених нарощенням поперечного перерізу бетоном.....	43

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

Андрійчук О.В., Громов Д.Ю. Вплив дисперсного армування на фізико-механічні властивості бетону: огляд.....	51
Єлісєєва М.О., Шило О.М. Практичні кейси рециклінгу вторинного скла у будівництві.....	68
Мартинов В.І., Тайчан Д.С. Регулювання водопотреби розчинової суміші для ніздрюватих бетонів пластифікаторами та механо-хімічною активацією.....	79
Намчук Д.В., Довбенко В.С. Нормативно-правова концептуалізація енергоефективності будівель.....	87
Семенова С.В., Левицький Д.В. Дослідження процесів структуроутворення реставраційних композитів на основі вапна...	97
Шинкевич О.І. Сухі будівельні суміші на основі фосфогіпсу модифікованого для автомобільних доріг....	109

ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Почапський М.Д., Бутнік С.В., Помазан М.Д. Аналіз тривалості монтажу збірного-монолітного каркасу малоповерхового будинку...	117
Вимоги до оформлення статей у збірнику Сучасне будівництво та архітектура.....	129

CONTENTS

ARCHITECTURE

- Buslenko H.Yu., Yudenko O.I.**
The building of the Kharchovik club in Kyiv: features and losses of the original design..... 7
- Kiuntsli R.V., Stepanyuk A.V.**
Evolution of regulatory frameworks for inclusive built environments: from parametric requirements to a scenario-based functional approach..... 16
- Minchenkov R.I.**
The role of artificial intelligence in adaptive architecture: modeling, analysis, and optimization of smart building parameters..... 24

BUILDING STRUCTURES

- Dubyk O.M., Chernyshova O.S., Osovskiy I.M., Kononenko D.Yu.**
Determination of the stress–strain state of the rigid pavement structure of an airfield access road 34
- Ivaneiko M.M., Khmil R.Ye., Blikharskyi Z.Ya.**
Approaches to calculating reinforced concrete slabs strengthened by adding a cross-section of concrete..... 43

BUILDING MATERIALS AND TECHNIQUES

- Andriichuk O.V., Hromov D.Y.**
Effect of dispersed reinforcement on the physico-mechanical properties of concrete: a review 51
- Yelisieieva M.O., Shylo O.M.**
Practical cases of recycling secondary glass in building..... 68
- Martynov V.I., Taichan D.S.**
Regulation of the water demand of mortar mixes for cellular concretes by plasticizers and mechano-chemical activation..... 79
- Namchuk D.V., Dovbenko V.S.**
Regulatory and legal conceptualization of energy efficiency of buildings..... 87
- Semenova S.V., Levytskyi D.V.**
Investigation of structure formation processes in lime-based restoration composites..... 97
- Shinkevich O.I.**
Dry construction mixtures based on phosphogypsum modified for motor roads..... 109

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF BUILDING PRODUCTION

- Pochapskiy A.O., Butnik S.V., Pomazan M.D.**
Analysis of the assembly duration of a precast-monolithic frame for a low-rise building..... 117
- Requirements for the articles formation in collection Modern construction and architecture..... 129**

**THE BUILDING OF THE KHARCHOVYK CLUB IN KYIV:
FEATURES AND LOSSES OF THE ORIGINAL DESIGN**

¹**Buslenko H.Yu.**, student,
hanna.buslenko@gmail.com, ORCID: 0009-0007-2427-8970
¹**Yudenko O.I.**, Associate professor,
oleksandr.yudenko@naoma.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0309-1548
¹*National Academy of Fine Arts and Architecture*
20 Voznesenskyi Uzviz, Kyiv, 04053, Ukraine

Abstract. The building of the current Music Theatre at 2 Mezhygorskaya Street, formerly the House of Culture or the Kharchovyk Club, is a prominent landmark on Kontraktova Square in Kyiv. It was built in the 1930s according to a design by the renowned architect Mykola Oleksandrovych Shekhonin. However, existing images show a noticeable difference between the final appearance of the building and the original design, although the latter was initially used. In printed publications that examine in detail the history of the construction of the former Kharchovyk Cultural Centre, this circumstance is either ignored or perceived as a normal working episode. Meanwhile, the facts show that construction was suspended at the final stage and part of the structures was redesigned, changing the appearance of the building. We have reason to believe that this unusual situation should be considered primarily in the context of the evolution of the Bolshevik leadership's attitude towards artistic forms at the time, in particular, the use of the constructivist style in the development of Soviet cities, which was initially perceived as the most "revolutionary" and then subjected to persecution. Based on this understanding of the changes to the building, an attempt has been made to reconstruct the course of events, examine the most characteristic features of M. Shekhonin's original design, and recreate the lost layout of the upper floors of the Kharchovyk Cultural Centre. It also shows the techniques the author of the project was forced to use in order to move away from the constructivist solution for the facades and volume of the building in the direction of "Soviet Art Deco" (later, during the restoration of the building in the late 1970s, the relevant elements were largely removed). The research materials allow us to conclude that the building of the former Kharchovyk Cultural Centre became a telling example of the direct intervention of ideological guidelines into architectural creativity at a certain historical stage.

Keywords: Art Deco, constructivism, reconstruction, workers' clubs, totalitarianism, Shekhonin M.

Introduction. The object of consideration is the former House of Culture (or club) "Kharchevnik", built in the Petrovsky (Podilsky) district of Kyiv as a centre for cultural and educational work for food industry workers (now the premises of the Music Theatre at 2 Mezhygorskaya Street). The building under study is located in the central part of the historic Podil district, is part of the development of the ancient Kontraktova Square, and is located next to the Baroque building of the Kyiv-Mohyla Academy (18th century) and the classicist Kontraktova House of the 1810s. In this distinguished setting, the former Kharchovyk Cultural Centre was intended to represent the constructivist architecture of the 20th century. However, its exterior underwent numerous transformations, and the history of its construction remains unclear. A series of available images shows that at the initial stage of construction, the building was erected in accordance with the original constructivist design by architect M. Shekhonin, but later its construction was suspended and resumed with a modified facade design.

Analysis of recent publications. The former Kharchovyk House of Culture occupies a prominent place in one of the most researched complexes of Kyiv's architecture. It has been mentioned more than once in literature. However, there are noticeable discrepancies, in particular, differences in the dating of the building. For example, the 1958 edition of the Kyiv guidebook states without further explanation that the building (then the Kyiv Palace of Culture of the Food Industry

Workers' Union) was built in 1933 [11, p. 153]. It should be noted, incidentally, that the protective plaque installed on the facade of the building as a result of its recognition as an architectural monument in 1986 contains the date "1933–1934".

Art historian Viktor Moiseenko, author of an article about the Kharchovyk club in the Compendium of Historical and Cultural Monuments of Ukraine, believed that construction of the building lasted from 1931 to 1933. Analysing the architectural design, he wrote nothing about the differences between the preliminary project and the final result and described the monument at 2 Mezhygorskaya Street as "a rare example of a public building from the transitional period between constructivism and Soviet neoclassicism" [12].

Dmytro Malakov, a researcher of M. Shekhonin's biography and local historian, also claimed that the building was completed in 1933 (although he dated the start of construction to 1929). He stated: "While the original design of the building remained unchanged, significant changes were made during construction. For example, the right-hand corner cubic volume was increased by one floor, and the balconies here, instead of the solid concrete barriers provided for in the project, were given transparent metal inserts, which visually and physically reduced the weight of the structure. The facade of the left wing on Mezhygorskaya Street also changed. The central, convex part of the facade was deprived of the upper tier of windows provided for in the project. However, the overall architectural image of the building remained as innovative and very expressive as before" [9, pp. 155, 156]. In other words, it can be understood that M. Shekhonin made significant changes to the project "in the course of work", apparently with the aim of enhancing the expressiveness and visual appeal of the building. D. Malakov also provided a number of interesting photographs, in particular from M. Shekhonin's author's album, but some of them were inaccurately dated, which made it difficult to imagine the actual course of events.

Semen Shirochin, author of a number of publications and books on the architecture of interwar Kyiv, recalls the Kharchovyk club and provides the most reliable dating of its construction. He examines the title lists of Kyiv construction projects for various years, starting with 1930, and notes that before 1935, an additional 300,000 rubles were allocated for the construction of the Kharchovyk club, and dates the completion of the work to the end of 1935. His article is also illustrated (some of the illustrations are borrowed from D. Malakov), but again, not all of the dates of the images are accurate, and S. Shirochin, like V. Moiseenko, does not pay attention to the discrepancy between the architect's original idea and its final implementation [16, pp. 293–297].

Among the sources reviewed, only the historical and architectural reference to the restoration and repair project "Restoration of the Kyiv Opera Theatre" (2020) notes that changes to the exterior of the building during construction were made "due to the influence of Soviet ideologues, who imposed contradictory assessments of architectural creativity in different years". The author of the reference cites a critical publication from 1933 (by M. Kholostenko), which most likely led to the departure from the original project [5]. To develop these ideas further, it would be worth analysing the specific content of the changes that took place at this stage (D. Malakov does not cover them fully) and trying to explain the lost solutions for the facades and plans. This would allow us to better understand the creative approach of the outstanding architect M. Shekhonin to constructivist design, as well as provide some "food for thought" given that the renovation and restoration work at the Music Theatre (or "Kyiv Opera") has not yet taken place.

The aim and objectives of the study: to reveal the influence of prevailing ideological attitudes on architectural creativity in Soviet times, to examine the forced alterations to the exterior of the building under study as a result of politicised criticism, and to identify the most characteristic lost features of the original design concept.

Research methodology: comparative analysis and reconstruction of events.

Main material. Constructivist architecture spread throughout Ukraine in the 1920s and found its most vivid expression in the then capital of Ukraine, Kharkiv. In Kyiv, it was actually introduced in 1927 (earlier, construction work here consisted primarily of overcoming the severe destructive consequences of numerous coups and hostilities during 1917–1920). Constructivism found many supporters not only for creative reasons, but also for ideological ones. It was perceived as a "new

style", a "revolutionary style", a rejection of "outdated bourgeois art", and adherence to it was actually presented as a sign of loyalty to the political course and "Marxist-Leninist doctrine". This was also mentioned in the manifestos of architectural groups of the same orientation, in particular, the TSAU (Society of Contemporary Architects of Ukraine). The young architect Mykola Kholostenko took an active part in the founding of the latter [10, p. 75].

The manifestos proclaimed the voices of the new generation ("New Generation" was the name of the literary and artistic association and magazine of "leftist" adherents with whom M. Kholostenko collaborated). However, in practice, the leading authors of constructivist architecture in Kyiv were specialists born in the 1870s–1880s. This was a generation that included architects with considerable pre-Soviet achievements: P. Alyoshin, O. Verbitsky, V. Krychevsky, V. Osmak, V. Rykov, and others. Among them was Mykola Oleksandrovych Shekhonin (1882–1970), who had already built a number of notable buildings in Kyiv during the 1900s and 1910s. All these masters creatively embraced the "new style", seeing in it the opportunity to introduce simple, "clean" forms and rational, logical compositions based on modern technology and materials, unshackled by templates. At the same time, experienced architects took into account the existing urban development with its peculiarities and traditions.

This was precisely what M. Shekhonin sought to achieve when he prepared the design for the Kharchovyk club on Chervona (Kontraktova) Square, commissioned by the trade union of workers in the meat and fish canning industry. When constructing a fairly large public centre on the site of an old estate destroyed in 1919, he did not try to visually diminish the existing historical buildings. On the contrary, according to his plan, the main masses of the Kharchovyk were stretched horizontally, with a fragmented front, and the most massive volume (the stage box on the side of Mezhygorskaya Street) was "pulled up" to the previously built local dominant feature – a six-storey apartment building at 6 Spasskaya Street. In general, the building, following the then common models of workers' clubs, was divided into two functional volumes – a club and a theatre, which were oriented along the modern Hryhorii Skovoroda and Mezhygirska Streets, respectively. They were connected by an intermediate cylindrical space that opened directly onto Kontraktova Square. On its first floor was a lobby, above which was a round hall for club activities and dancing.

Construction of the club began in 1930. This can be judged not only from the title lists reviewed by S. Shyrochyn, but also from that year's guidebook, which reported on the ongoing construction according to M. Shekhonin's project [6, p. 588]. The 1932 edition included a project image (Fig. 1), which formed the basis for the work being carried out [1, p. 125].

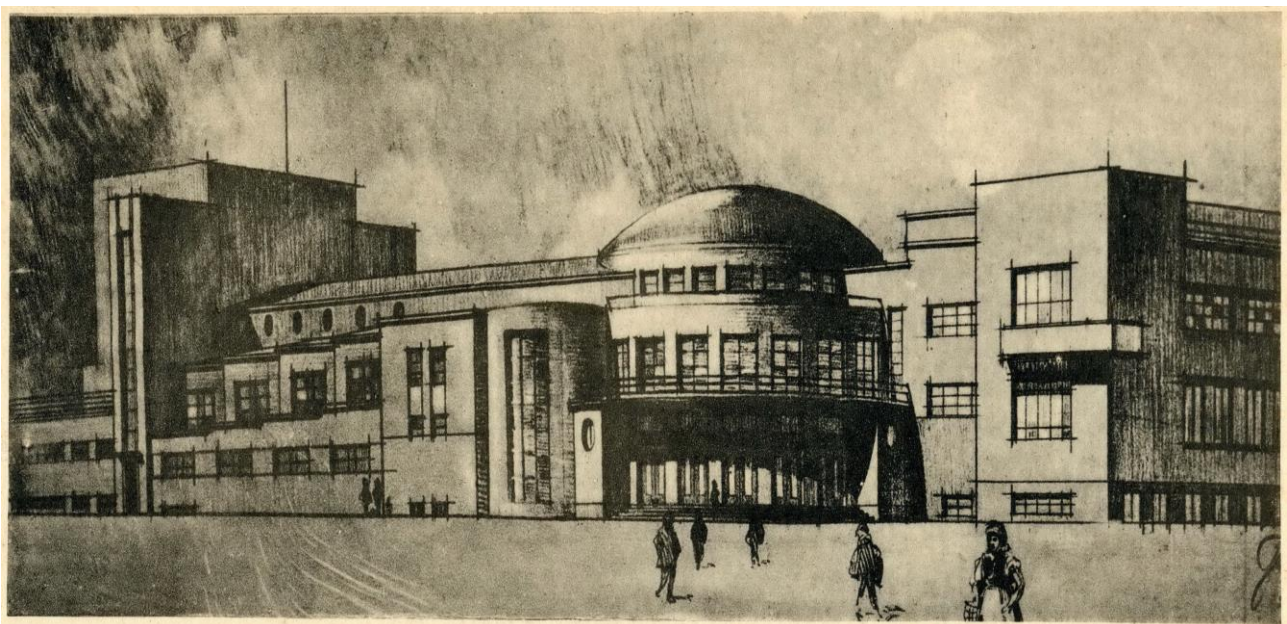


Fig. 1. M. Shekhonin. Initial design of the facades of the Kharchovyk club. 1931–1932

In early 1933, a photo of the new building appeared in the press (Fig. 2), the construction of which seemed to be nearing completion [15, p. 7]. The material embodiment basically corresponded to the author's idea. Some changes were made to the corner part on the side of the modern Hryhorii Skovoroda Street. D. Malakov believed that during construction, "the right corner volume grew by one floor" [9, p. 155], but in fact its height did not increase; only the area of the window opening was adjusted and another balcony was added.

Both the project and the photo allow us to see certain features of the building that were later removed and not restored. These are primarily the cylindrical intermediate volume and the theatre part. The cylindrical surface on the side of the square was to be completely "dematerialised" by openings. During the day, the round hall received natural lighting from two sources, while the cylinder acquired a stepped structure. The presence of a dome above the chain of windows was reminiscent of the tradition of Byzantine sacred buildings, long known in Kyiv. The façade along Mezhygorskaya Street was impressive in its richness and dynamism. Its appearance was determined by the stepped boxes of the second tier of the auditorium. All the boxes corresponded to the stepped, well-lit foyers leading to the façade, as well as the adjacent loggias. It seems that the author of the project took into account that the auditorium could be used both for performances and concerts, as well as for festive or working meetings of trade union members. With this in mind, the foyers and loggias next to the boxes became a kind of lobby where people could communicate and exchange ideas during events. In general, the project provided for a significant number of balconies and loggias, which allowed visitors to take "smoke breaks" or breathe fresh air. From an architectural point of view, all this brought the new building closer to historical buildings in terms of scale.

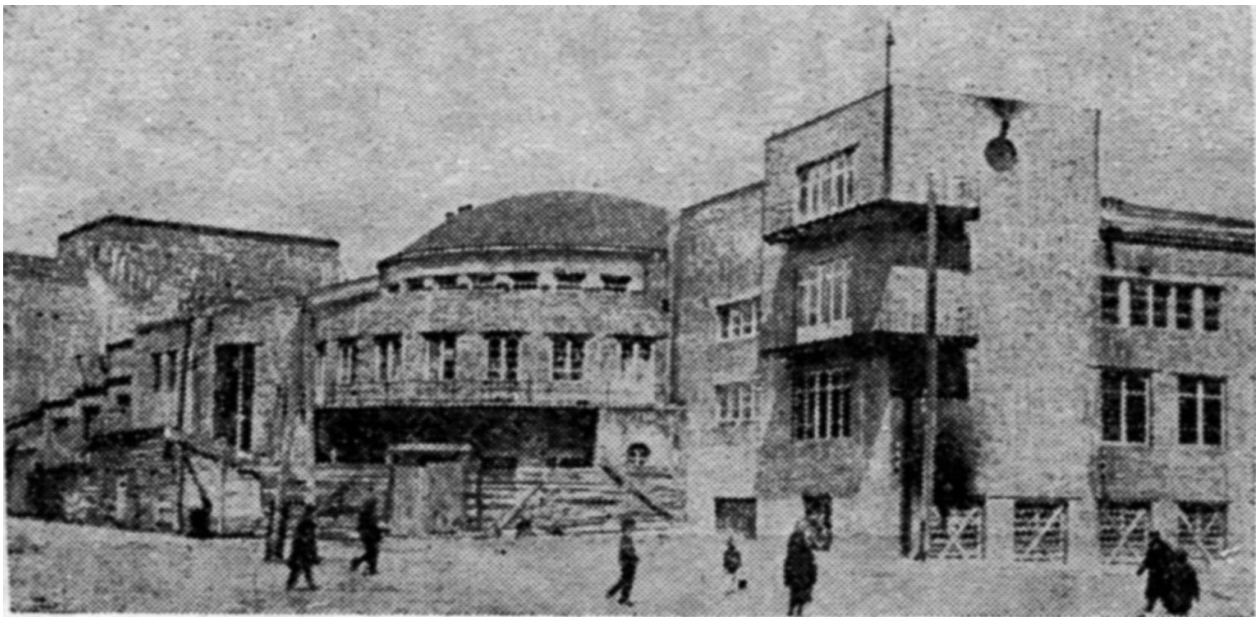


Fig. 2. Construction of the Kharchovyk club in its original form. Publication from 1933

However, starting in 1933, a campaign unfolded in Kyiv that ultimately revised previous creative explorations in architecture. It became one of the manifestations of the infamous social processes of the Stalinist totalitarian era. These processes instilled a spirit of unanimity and obedience among the general public, promoting the "only correct" opinion of the leadership. Any free discussion was suppressed, especially against the backdrop of the stark contrast between optimistic declarations and acute socio-economic problems, which found tragic reflection in the Holodomor of 1932–1933.

At this time, architecture was once again transformed into the material embodiment of the prevailing ideological attitudes. The personal tastes of the "leader of the peoples" and his entourage, who preferred conservative forms and external pomp, played a decisive role. Instead of creative exploration, architects once again had to submit to established guidelines. It was as if the workers were being given back the adornments that had been "stolen by the formalists". Any objections were

interpreted by official propagandists as a "class-hostile" position, which was very dangerous in the context of unfolding political repression.

Taking into account the aforementioned realities, the events in Kyiv architecture in the 1930s become understandable. One of the "first warnings" was a publication in the magazine *Socialist Kyiv*, a review of local new buildings with the telling title "Against simplified schematism – for the joyful architecture of built socialism. *That's right!* The practice of urban construction and the tasks of Soviet architects in Kyiv". In it, new buildings were criticised for being "mainly constructed in the form of simplified schematism, the so-called 'new style' or in the style of simplified modernism of pre-revolutionary apartment buildings in Kyiv from 1910-1914. (the latter two types are most common in Kyiv), and they also reflect the influences of contemporary Western architecture – the architecture of rotten capitalism and echoes of Soviet constructivism". Combining all manifestations of "hostile architecture" in such a not very clear period, the author expressed corresponding claims to a number of specific objects. Among them was the Food Industry Club, which was described as "architecturally unsatisfactory, with unfavourable proportions". The publication hinted at the personal responsibility of the architects for the alleged mistakes, since "the opportunities and conditions for the project's authors were favourable" [14, pp. 11, 13]. It is very telling that the author of the aforementioned article was none other than M. Kholostenko, the recent ideologist of Ukrainian constructivism. In those difficult times, some people felt it necessary to "change their shoes" as quickly as possible and protect themselves with the help of "correct" statements.

The condemnation of the constructivist movement became even more active in 1934, when Kyiv regained its status as the capital of Ukraine. From then on, Kyiv's architecture set the tone and became a model for the entire republic. "Correcting mistakes" went as far as direct intervention in the physical structure of buildings. In an article by M. Kalnytsky for the publication "The Architecture of Kyiv 1921–1932" gives examples such as the Zhovten cinema, this was «redressed» with new facades, or the Jewish theatre on Khreshchatyk, which was left unfinished and eventually demolished due to the frantic search for appropriate forms. The most striking example was the fate of the "building of institutions" on the corner of what are now Bohdan Khmelnytsky Street and Khreshchatyk Street, which was started in 1932 and largely built in a distinctly constructivist style. Its builder, incidentally, was M. Kholostenko, who was not helped by enthusiastic publications. The building was completely demolished; in its place, the Central Universal Store (TSUM) was later built [4, pp. 15, 16]. To these examples, we can add the constructivist building of the former Zootechnical Institute, designed by D. Dyachenko [1, p. 118; 14, p. 13], which was eventually rebuilt with "enriched" facades (now the National University of Life and Environmental Sciences).

As for the Kharchovyk club, it became an example of facade and floor plan transformations directly during construction, due to the extension of its terms. What were the main changes?

The cylindrical volume was simplified, the stepped structure was removed, and the diameter of the dome was increased accordingly. The second-light windows were eliminated, leaving a blank surface on the façade, divided by vertical blades. The ring balcony on the third floor lost its exit to the outside.

On the side of Mezhygorskaya Street, the small volumes of the local foyers and adjacent balconies were completely removed. Subsequently, the stepped lodges, which had already been completely completed inside [9, p. 153]), were converted into horizontal balconies with a common foyer. Times had changed, and there was no need for independent communication between event participants – everyone had to show unanimity and vote "yes". Instead, a completely ordinary façade with regular, paired windows was built on the street side.

Subsequently, the composition of the facades of the former Kharchovyk club did not undergo any fundamental changes – only the details differed. Immediately after the reconstruction, in 1935–1936, relatively few elements were added (primarily cornices, blades and four pylons under the cylindrical balcony), as evidenced by the photograph in Fig. 3, published in 1936. [8, p. 15].

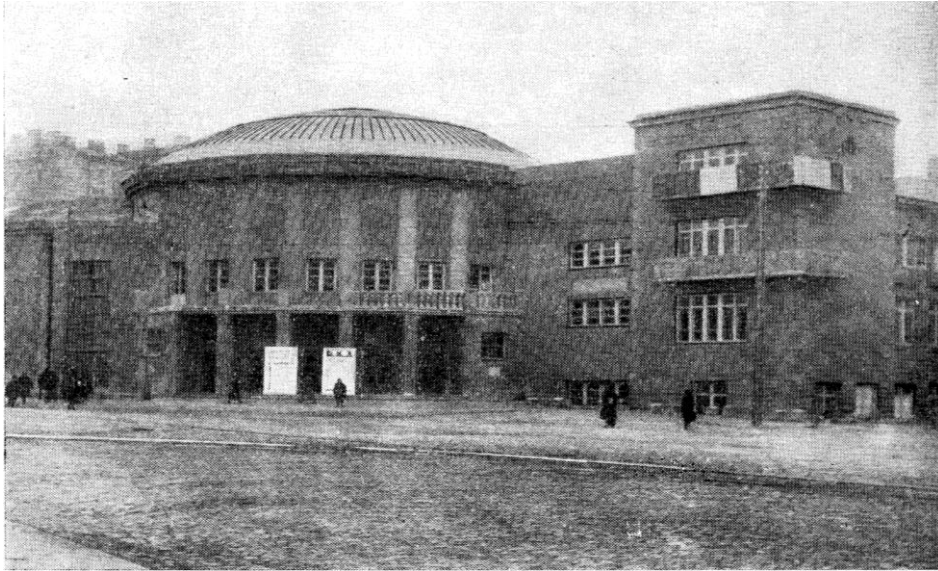


Fig. 3. The Kharchovyk Club after the first stage of reconstruction. Published in 1936

However, over time, the "enrichment" of the building's exterior became quite pronounced. By the end of the 1930s, additional Art Deco elements had been added: patterns on the plaster, balustrades above the cornice, balusters in the balcony railings, and in some places, cornices and mouldings. All this can be seen in the photograph in Fig. 4, published in 1939 [13, p. 21]. Since then, the Kharchovyk club no longer aroused suspicion of formalism. This was further facilitated by the interior design, which was carried out at different times in accordance with the requirements of socialist realism (in particular, the ornamental and decorative decoration by the artist H. Dovzhenko, 1956–1957 [2, pp. 10, 14]). Thus, the building acquired eclectic features, although the overall spatial design testified to the high professionalism of the author.

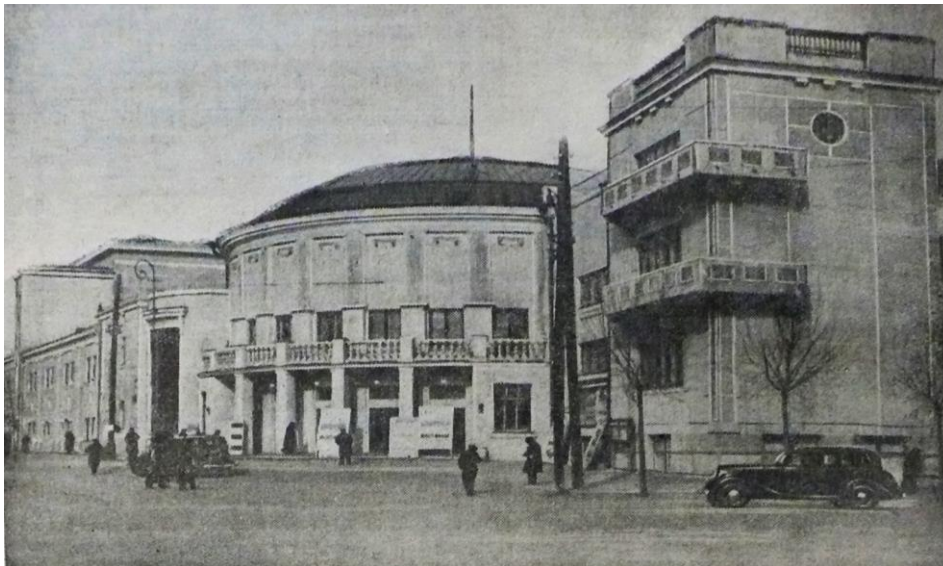


Fig. 4. The Kharchovyk Club after the second stage of transformations. Publication from 1939

However, later, in the 1960s and 1970s, attitudes towards the domestic heritage of constructivism changed for the better. Certain principles of this movement were revived in the architecture of "Soviet modernism," particularly in the work of such Kyiv architects as E. Bilsky, M. Budylovsky, A. Miletsky, N. Chmutina, F. Yuryev, and others. In line with these preferences, at the end of the 1970s, it was decided to reconsider the decoration of the facades of the public building at 2 Mezhygorskaya Street. During the repair and restoration work under the direction of architect O. Grauzy, decorative layers were removed from the front facades (they were partially preserved at the

rear of the building). Clean geometric volumes, smooth texture of plastered surfaces, and clear outlines of openings were restored.

After the transformation, the former Kharchovyk House of Culture was renamed the Slavutych Palace of Culture; during 1980–1985, performances of the Variety Theatre took place here [3, pp. 24, 25]. In 1993, the building ceased to be under departmental control and was given the status of the Kyiv City Arts Centre "Slavutych". Later, in 1998, the Kyiv State Music Theatre for Children and Youth began performing in the building. This was preceded by the reconstruction of the main hall with the installation of an orchestra pit. The round hall took on the appearance of a chamber stage with an amphitheatre. Thus, the existing interior layout took into account the functional changes of different periods. Since 2024, the official name of the institution located at 2 Mezhygorskaya Street has been the Kyiv Municipal Academic Opera and Ballet Theatre, abbreviated as the Kyiv Opera [7].

The current exterior of the building (Fig. 5) was mainly determined by the renovation and restoration work carried out in the 1970s. However, there are still some problematic areas related to past violent interventions. We are referring, in particular, to the extremely bland façade of the main hall on Mezhygorskaya Street and the dull, monotonous surface of the cylindrical volume at the level of the upper tier (currently decorated with the inscription "Music Theatre"). In view of this, an attempt has been made to reconstruct the original author's vision of the appearance of the plans and facades of the building (Fig. 6) in order to better understand the ways of restoring this cultural heritage site in the future.



Fig. 5. The Music Theatre building in its current form. Photo by the author, 2020.

Conclusion. The former Kharchovyk Club in the Podilskyi district of Kyiv was conceived by its author, the renowned Kyiv architect M. Shekhonin, as an expressive work of constructivist domestic architecture. It met functional needs well, used clear geometric forms, and at the same time was consistent in its volumetric and spatial characteristics with the historical buildings of Kontraktova Square. However, during its construction, processes related to totalitarian pressure on architectural creativity were actively unfolding in the country's public and political life. This led to significant distortions in the planning and design of the building's facades. Some of them were later removed, but some of the changes proved irreversible. It is necessary to be aware of the complex history of the building when referring to it as an example of urban architecture of a certain period, as well as when considering the possibility of restoration work here in the future.

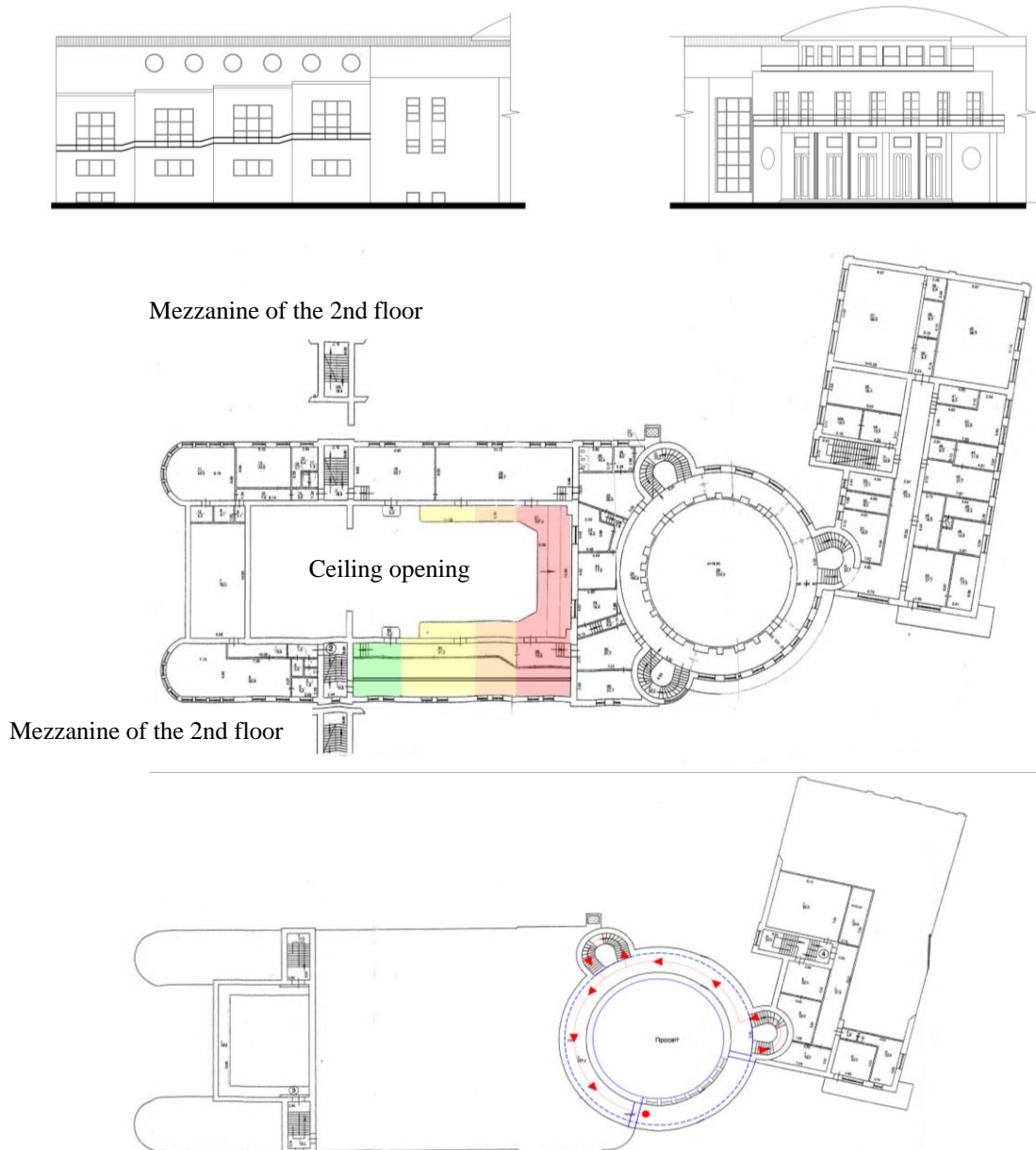


Fig. 6. Attempt to reconstruct the original design by M. Shekhonin (facade fragments, plans of the 2nd and 3rd floors)

References

- [1] *Budova sotsialistychnoho Kyieva*. Kyiv, 1932.
- [2] Hryhorii Dovzhenko. *Kataloh vystavky tvoriv*. Compiled by V.V. Ruban. Kyiv, 1983.
- [3] L. Zhilina, V. Turkevich, *Teatry i kontsertnye zaly Kieva*. Kiev, 1983.
- [4] M. Kalnytskyi, *Naochnyi litopys pozastolychnoho Kyieva. Budova Kyieva. 1921–1932*. Kyiv, 2020.
- [5] M. Kalnytskyi, Klub «Kharchovyk». *Istoryko-arkhitekturna dovidka. Restavratsiia teatru «Kyivska opera»*. [Online]. Available: <https://cs.org.ua/project/13-teatr-na-podoli>. Accessed on: November 30, 2025.
- [6] *Kyiv: Providnyk*. Edited by F.L. Ernst. Kyiv, 1930.
- [7] *Kyivska opera. Istoriiia teatru*. [Online]. Available: <https://kyivoperatheatre.com.ua/history/>. Accessed on: December 15, 2025.
- [8] D. Liberman, "Novi vohnyshcha kultury", *Sotsialistychnyi Kyiv*, no. 3, pp. 14–18, 1936.
- [9] D. Malakov, *Arkhitektor Shekhonin: try epokhy*. Kyiv, 2017.
- [10] O.V. Maliiova, "Tvorchyi shliakh vydatnoho zodchoho i pedahoha M.V. Kholostenko. Do

- yuvileiu kafedry APTsBS KNUBA", *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia*, vol. 40. pp. 74–81, 2015.
- [11] D.I. Myshko, I.O. Ihnatkin, M.M. Lysenko, *Kyiv. Putivnyk-dovidnyk*. Kyiv, 1958.
- [12] V. Moiseienko, *Klub «Kharchovyk», Zvid pamiatok istorii ta kultury Ukrainy*. Kyiv. Knyha 1, part 1. Kyiv, 1999.
- [13] D. Unikel, "Kyiv u III piatyrichtsi", *Radianskyi Kyiv*, no. 7, pp. 20–23, (1939).
- [14] M. Kholostenko, "Proty sproshchenoho skhematyzmu, – za radisnu arkhitekturu budovanoho sotsializmu. Praktyka miskoho budivnytstva ta zavdannia radianskykh arkhitektiv Kyieva", *Sotsialistychnyi Kyiv*, no. 3–4, pp. 11–14, 1933.
- [15] Ye. Tseltner, "Na borotbu za plian 1933 roku", *Sotsialistychnyi Kyiv*, no. 1–2, pp. 5–7, 1933.
- [16] S. Shirochin, *Arkhitektura mezhvoennogo Kieva. Inertsia. Vozrozhdenie. Konstruktivizm*. Kiev, 2022.

БУДИНОК КЛУБУ «ХАРЧОВИК» У КИЄВІ: ОСОБЛИВОСТІ І ВТРАТИ ПЕРВИННОГО ЗАДУМУ

¹Бусленко Г.Ю., студентка,

hanna.buslenko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0309-1548

¹Юденко О.І., доцент,

oleksandr.yudenko@naoma.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0309-1548

¹Національна академія образотворчого мистецтва і архітектури
узвіз Вознесеньський, 20, м. Київ, 04053, Україна

Анотація. Споруда нинішнього Музичного театру на вул. Межигірській, 2 – колишнього Будинку культури або клубу «Харчовик» – є помітним об'єктом на Контрактовій пл. у Києві. Її було зведено у 1930-і рр. за проектом відомого архітектора Миколи Олександровича Шехоніна. При цьому наявні зображення показують помітну відмінність остаточного вигляду будівлі від первинного проекту, хоча спершу був використаний саме він. У друкованих публікаціях, які докладно розглядають історію спорудження колишнього БК «Харчовик», цій обставині або не приділено уваги, або сприйнято її як звичайний робочий епізод. Між тим факти засвідчують призупинення будівництва вже практично на фінішній стадії та подальшу переробку частини конструкцій зі зміною зовнішнього вигляду споруди. Маємо підстави вважати, що цю незвичну ситуацію слід розглядати насамперед у контексті еволюції тогочасного ставлення більшовицького керівництва до художніх форм, зокрема, до використання в забудові радянських міст конструктивістського стилю, що його спершу було сприйнято як найбільш «революційний», а потім піддано гонінням. Згідно з таким розумінням змін будівлі зроблено спробу реконструювати хід подій, розглянути найбільш характерні особливості попереднього задуму М. Шехоніна, відтворити втрачене планування верхніх поверхів БК «Харчовик». Показано також, якими прийомами був змушений скористатися автор проекту, аби відійти від конструктивістського вирішення фасадів і об'єму будівлі у напрямку «радянського ар-деко» (в подальшому, під час реставраційного перетворення об'єкта наприкінці 1970-х рр., відповідні елементи значною мірою були усунуті). Матеріали дослідження дозволяють дійти висновку, що корпус колишнього БК «Харчовик» став промовистим прикладом прямого втручання ідеологічних настанов до архітектурної творчості на певному історичному етапі.

Ключові слова: ар-деко, конструктивізм, реконструкція, робітничі клуби, тоталітаризм, Шехонін М.

Стаття надійшла до редакції 19.12.2025

Стаття прийнята до друку 11.02.2026

Дата публікації статті 20.03.2026

[This work](#) © 2026 by [Buslenko H.Yu.](#), [Yudenko O.I.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

EVOLUTION OF REGULATORY FRAMEWORKS FOR INCLUSIVE BUILT ENVIRONMENTS: FROM PARAMETRIC REQUIREMENTS TO A SCENARIO-BASED FUNCTIONAL APPROACH

¹**Kiuntsli R.V.**, Doctor of Art History, Professor,
romana.lviv@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5234-4903

¹**Stepanyuk A.V.**, PhD, Associate Professor,
andriy.lviv@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5030-5724

¹*Stepan Gzhytskyi Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies*
50 Pekarska Street, Lviv, 79010, Ukraine

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of international approaches to the regulatory framework governing accessibility and inclusivity of the built environment from an architectural and legal perspective. The relevance of the study is driven by the need to reconsider the current system of Ukrainian state building regulations in the field of inclusion, which, under conditions of post-war reconstruction, redevelopment of historical environments, and adaptation of public buildings to contemporary requirements, increasingly reveals the limitations of a purely parametric approach. It is demonstrated that architectural accessibility, in its modern understanding, cannot be reduced solely to technical compliance with regulatory indicators but represents a materialized form of implementing the principles of equality, human dignity, and non-discrimination within the spatial environment.

The paper examines the provisions of DBN V.2.2-40:2018 in comparison with international standards and national regulatory documents of selected countries, including ISO 21542:2021, DIN 18040 (Germany), TEK17 (Norway), Disability (Access to Premises — Buildings) Standards 2010 (Australia), Approved Document M and BS 8300 (England), the Spanish Building Technical Code (Código Técnico de la Edificación), and SIST EN 17210 (Slovenia). The analysis focuses on identifying methodological differences between the parametric regulatory model characteristic of the Ukrainian normative framework and the scenario-based and performance-based approaches applied in international practice.

The methodological framework of the study is based on comparative legal analysis, a systemic examination of the built environment, and a scenario-based functional approach to assessing spatial use by different population groups. The results indicate that there are no fundamental discrepancies between Ukrainian and international regulatory documents regarding basic geometric accessibility parameters. However, the key difference lies in the logic of regulation: while Ukrainian state building norms are primarily oriented toward fixing minimum permissible parameters as compliance criteria, international standards and national systems of leading countries emphasize the achievement of functional accessibility outcomes.

The synthesis of international experience substantiates the feasibility of a two-level regulatory model for inclusivity, which combines mandatory minimum technical requirements as a baseline level of compliance with the possibility of applying alternative design solutions, provided that their equivalent or higher inclusive quality is demonstrated. The findings may be used in the process of updating Ukrainian state building regulations, as well as in architectural design and expert practice when substantiating inclusive solutions under complex architectural and urban planning conditions.

Keywords: inclusion, accessibility, universal design, state building regulations, scenario-based functional approach, international standards.

Introduction. In the second half of the twentieth and early twenty-first centuries, provisions aimed at ensuring the barrier-free and inclusive character of the built environment have evolved from narrowly specialised technical prescriptions into indicators of the maturity of the legal system and the democratic character of the state. Architectural accessibility is increasingly understood not as an optional social feature, but as a materialised expression of respect for human dignity, equality, and non-discrimination.

It is precisely through the norms of construction and urban planning law that abstract constitutional principles acquire a spatial dimension — manifested in the dimensions and logic of horizontal and vertical circulation, and in the ability to use space independently without external assistance.

Comparative analysis of international experience demonstrates that the higher the level of democratic development of a state, the more systematic and detailed is its regulatory concern for the individual as a user of space. In democratic legal systems, inclusion is secured not only through general declarations, but also through binding technical standards, effective enforcement mechanisms, and the availability of legal remedies in cases of non-compliance. Consequently, barrier-free design becomes not an "additional convenience", but a legally guaranteed right, the implementation of which does not depend on the discretion or goodwill of the client or designer. This approach fosters a new professional culture in which inclusivity is perceived as a fundamental qualitative attribute of architectural design.

Despite differences in political regimes and levels of democratic development, even states with limited democratic institutions seek to demonstrate alignment with contemporary global trends in human rights and social inclusion. This is reflected in the adoption of regulatory acts and technical provisions that, at least formally, declare the necessity of ensuring accessibility for persons with disabilities and persons with reduced mobility. In such legal systems, inclusivity is typically codified in the form of framework social legislation or general provisions within construction regulations, which do not constitute a comprehensive system of universal design and are rarely supported by detailed technical standards or effective enforcement mechanisms. At the same time, the very existence of such instruments — including laws on the protection of the rights of persons with disabilities or specific provisions within national building codes — indicates an intention to "keep pace with modern developments" by integrating the fundamental principles of barrier-free accessibility into national law, even where their practical implementation remains limited.

In this context, a comparison of Ukrainian state building codes in the field of inclusivity with international standards and the regulatory practices of selected countries makes it possible not only to identify technical differences, but also to conceptualise the deeper relationship between architectural accessibility, democratic institutions, and legal culture as a whole. Within this framework, inclusion emerges as a spatial-legal category reflecting the degree of state attention to all segments of the population and their everyday needs.

Analysis of Recent Research and Publications. The issue of ensuring barrier-free accessibility and inclusivity of the built environment has been extensively examined over recent decades in the works of international and Ukrainian scholars, as well as within international standards and regulatory frameworks. A significant body of contemporary research focuses on the concept of universal design as both a theoretical and practical foundation for the creation of accessible environments, as reflected in the works of R. Imrie [1], S. Goldsmith [2], and M. Story [3], as well as in the recommendations of the United Nations and the European Union.

Recent publications in professional architectural and urban planning journals increasingly emphasise the relationship between inclusion, quality of life, and spatial justice, as well as the necessity of integrating accessibility principles into the overall design logic rather than applying them as isolated technical additions.

At the same time, a substantial body of literature is devoted to the analysis of regulatory frameworks governing accessibility in different countries. International research increasingly highlights the effectiveness of performance-based and scenario-based regulatory models, which allow for the reconciliation of mandatory requirements with design flexibility. This approach is reflected in international standards such as ISO 21542 [4] and EN 17210 [5], as well as in national regulations, including Germany's DIN 18040 [6], Norway's TEK17 [7], the United Kingdom's Approved Document M and BS 8300 [8, 9], and Australia's Disability (Access to Premises — Buildings) Standards [10]. Within these documents and related academic publications, accessibility is conceptualised not as a checklist of minimum dimensional requirements, but as the achievement of functional usability of space for a diverse range of users.

In recent Ukrainian academic publications, the issue of inclusion in construction and

architecture has been primarily addressed in two main dimensions. First, it is examined as a matter of social protection and the realisation of the rights of persons with disabilities. Second, it is considered in the context of compliance with existing national building regulations, particularly DBN V.2.2-40:2018, including Amendment No. 1 [11]. Within this regulatory-oriented approach, a significant proportion of publications focus on explaining and verifying the compliance of design solutions with DBN requirements and on describing specific accessibility elements, such as circulation routes, ramps, entrance groups, and sanitary facilities. This is evident, in particular, in works addressing inclusivity in architectural theory and practice (V. Shulyk) [12], applied research on the design of entrance groups and spatial planning solutions (O. Kovalska; P. Dumnych) [13], broader typological and urban studies (V. Osychnanskyi; A. Dmytrenko; Ye. Yanovytskyi) [14], and related engineering and safety research that considers the needs of persons with reduced mobility in evacuation scenarios (M. Peleshko; V. Myroshkin) [15].

In parallel, a growing body of research emphasises universal design as a contemporary framework for the formation of barrier-free environments (O. Baldyniuk) [16], alongside studies reviewing and synthesising international approaches (O. Anholova) [17] and examining the application of DBN requirements to specific building types (Ya.-R. Chernii) [18]. However, despite the accumulation of applied research, the Ukrainian academic discourse has not yet sufficiently developed a methodological re-evaluation of the regulatory model itself — namely, the transition from a "catalogue of parameters" approach toward a scenario-based and performance-oriented understanding of accessibility, compatible with European standards and the practice of alternative design solutions, provided that an equivalent or higher level of inclusive quality can be demonstrably achieved.

Thus, despite the existence of a substantial body of research, the integration of a scenario-based and performance-oriented approach into the national system of building regulation in Ukraine remains insufficiently developed. In particular, the academic discourse lacks studies aimed at substantiating mechanisms for reconciling the strict regulatory control function of the DBN with the possibility of applying alternative design solutions that provide an equivalent level of inclusive quality. This gap — between formal regulatory compliance and the actual accessibility of space — defines the subject of the present study.

The results of the research indicate that there are no fundamental contradictions between Ukrainian and international standards with regard to the basic geometric parameters of accessibility. The key distinction lies in the regulatory methodology: whereas the DBN is primarily oriented toward the specification of minimum permissible parameters, international standards and national regulatory systems of leading countries apply a scenario-based or performance-based approach, in which parameters are understood as instruments for achieving functional accessibility rather than as ends in themselves. The scientific novelty of this study lies in substantiating a two-tier regulatory model that combines mandatory minimum requirements with the possibility of applying alternative design solutions, provided that their equivalent or superior inclusive quality can be demonstrated.

The practical significance of the obtained results lies in the potential application of the proposed model in the revision of DBN V.2.2-40:2018, as well as in design and expert practice when substantiating inclusive solutions in complex architectural and urban planning contexts.

Purpose and Objectives of the Study. The purpose of this article is to substantiate the possibilities for the evolutionary revision of Ukrainian state building codes in the field of inclusivity of the built environment by integrating mandatory minimum technical requirements with a scenario-based and performance-oriented approach to accessibility assessment, based on an analysis of international standards and national regulatory systems of selected countries.

To achieve this objective, the article addresses the following tasks:

1. To analyse the current regulatory model for ensuring barrier-free accessibility in Ukraine, as established in DBN V.2.2-40:2018, from the perspective of its parametric logic and regulatory control function.
2. To conduct a comparative analysis of DBN V.2.2-40:2018 and the international standard ISO 21542:2021 in order to identify methodological differences in approaches to accessibility regulation.
3. To examine national regulatory systems governing inclusivity of the built environment in

selected countries (Germany, Norway, Australia, England, Spain, and Slovenia) as examples of scenario-based and performance-based regulatory models.

4. To substantiate a two-tier regulatory model for inclusion that combines mandatory minimum requirements with the possibility of applying alternative design solutions.

5. To identify practical directions for applying the proposed model in design and expert practice, as well as in the process of revising national building codes.

Materials and Methods. The research materials included international and national legal, regulatory, and technical documents related to accessibility and inclusivity of the built environment, in particular DBN V.2.2-40:2018 [11], ISO 21542:2021 [4], DIN 18040 [6], the Norwegian technical regulation TEK17 [7], the Disability (Access to Premises — Buildings) Standards 2010 (Australia) [10], Approved Document M and BS 8300 (England) [8, 9], the Código Técnico de la Edificación (Spain) [19], SIST EN 17210 (Slovenia) [5], as well as related methodological and analytical materials.

The methodological framework of the study is based on the comparative legal method, which enabled the comparison of regulatory approaches to inclusion across different legal systems and the identification of their common features and distinctions. A systems approach was applied to analyse the built environment as an integrated set of spatial, functional, and regulatory elements. To assess the actual usability of architectural solutions, a scenario-based and performance-oriented method was employed, involving the analysis of circulation routes, manoeuvring, orientation, and the use of key building functions by different user groups. In addition, formal-logical and structural-analytical methods were applied to generalise the findings and to formulate conclusions regarding the possibilities for the evolutionary revision of national building regulations.

Main Body. The current state building codes of Ukraine in the field of inclusivity, in particular DBN V.2.2-40:2018 [11], are predominantly structured according to a parametric regulatory logic. Within this framework, accessibility of the built environment is defined through a set of minimum permissible geometric and technical parameters of the usable space, including ramp gradients, passage widths, sanitary facility dimensions, door opening parameters, and related characteristics. Compliance with these parameters constitutes a mandatory condition for obtaining expert approval and commissioning of a building.

This approach ensures formal controllability and standardisation of design solutions; however, it has limited capacity to assess the actual usability of space for independent use by diverse user groups. Within the DBN framework, instruments for scenario-based analysis of building use are largely absent, and deviations from prescribed parameters — even where functional accessibility is effectively achieved — are typically interpreted as regulatory violations. This limitation is particularly problematic in the context of renovation projects, historic buildings, and complex urban conditions.

The international standard ISO 21542:2021 [4] is based on a fundamentally different regulatory methodology, centred on the concepts of accessibility and usability of the built environment. Unlike DBN [11], ISO [4] does not reduce inclusivity to a fixed set of dimensional requirements, but instead conceptualises it as the outcome of a coherent user scenario, encompassing the entire sequence of spatial interaction — from arrival at the site to the completion of activities within the building as a user of the built environment.

Comparative analysis demonstrates that there are no fundamental contradictions between DBN V.2.2-40:2018 [11] and ISO 21542 [4] with respect to basic geometric parameters. The difference lies not in the numerical values themselves, but in the logic of their application: whereas DBN establishes minimum permissible values as fixed compliance criteria, ISO treats such parameters as one of several possible means of achieving functional accessibility. Consequently, the standard allows for alternative design solutions, provided that an equivalent or higher level of inclusive quality of the built environment can be demonstrated.

Based on the comparison of Ukrainian and international regulatory practices, it is appropriate to propose an evolutionary model for revising DBN in the field of inclusivity. The essence of this model lies in the introduction of a two-tier regulatory system. The first tier retains mandatory minimum technical requirements as a baseline standard of compliance, ensuring the state's regulatory control function and providing legal certainty for expert review.

The second tier provides for the possibility of applying alternative design solutions that deviate from specific prescribed parameters but achieve an equivalent or higher level of accessibility from the perspective of user scenarios. Such solutions must be supported by a substantiated demonstration of functional usability, including safe manoeuvring, independent use, and spatial orientation. The introduction of this tier would enable the transformation of DBN from a purely prescriptive regulatory instrument into a framework for the professional assessment of the inclusive quality of architectural design solutions.

The effectiveness of this two-tier model (mandatory minimum parameters combined with permitted alternative solutions) is clearly demonstrated in countries where accessibility regulation is structured not as a rigid catalogue of numerical values, but as a system of accessibility objectives and verifiable functional outcomes. In Germany, for example, the DIN 18040-1:2010-10 standard [6] establishes clear minimum geometric requirements for circulation routes, including corridors and communication spaces that must be sufficiently wide to accommodate wheelchair users and bidirectional movement, typically with a minimum width of 150 cm, alongside specific provisions for narrow sections and passing areas. At the same time, DIN incorporates the logic of *Schutzziele* (protective or functional objectives), whereby a requirement — such as the perceptibility of glass walls — may be satisfied through alternative means, provided that the same functional objective of safety and orientation is achieved. This fundamentally distinguishes the DIN approach from a strictly parametric interpretation of DBN, as it grants architects the possibility of implementing alternative spatial or technical solutions, subject to the obligation to demonstrate functional equivalence in terms of visibility, legibility, and safe passage.

In Norway, a comparable form of functional flexibility is provided by TEK17 (Regulations on Technical Requirements for Construction Works) [7], where requirements are formulated in terms of usability and functional accessibility of routes and entrances. For buildings subject to universal design requirements or accessible residential units, the regulation establishes step-free access, maximum permissible slopes (not steeper than 1:15), and minimum corridor widths of 1.5 m, with certain exceptions for short sections. In addition, functional manoeuvring spaces in front of doors (typically 1.5×1.5 m) and other usability-related requirements are prescribed. For the purposes of Ukrainian comparative analysis, this is particularly significant, as TEK17 explicitly links dimensional requirements to user scenarios — such as orientation, passing of two wheelchair users, accessibility of controls, and safety — thereby reflecting a scenario-based and performance-oriented logic that remains insufficiently developed in DBN, where parametric prescriptions tend to dominate.

A second group of examples demonstrates the integration of inclusivity through the interconnection of human rights protection, building regulation, and functional standardisation. In Australia, the relationship between the right to non-discrimination and architectural solutions is formalised in the *Disability (Access to Premises — Buildings) Standards 2010* [8, 9], in conjunction with the Access Code. This regulatory framework explicitly operates within a performance-based paradigm: it first establishes a Performance Requirement — for example, sanitary facilities must be "suitable", taking into account the building's function, the number of users, and their needs — and subsequently defines the *Deemed-to-Satisfy* provisions, specifying how compliance may be demonstrated through adherence to particular technical criteria. A similar logic applies to vertical circulation, where the requirement that "a lift must be suitable for use by persons with disabilities" defines the intended functional outcome, followed by a set of acceptable technical solutions through which this outcome may be achieved.

In England (United Kingdom), building regulations are reinforced by governmental guidance documents. Approved Document M (*Access to and Use of Buildings*) refers to BS 8300-2:2018 [8] as a recognised code of practice for inclusive environments and introduces mandatory provisions for specialised accessibility solutions, including, for example, *Changing Places* toilets in certain categories of large public buildings. In this context, inclusivity is not treated as an optional feature, but as an essential quality requirement of public infrastructure.

The Spanish regulatory model is likewise illustrative, as inclusivity is embedded within the *Código Técnico de la Edificación (CTE)* [19]. The Code explicitly permits the use of alternative

technical solutions, provided that their equivalence to established requirements is adequately substantiated. At the same time, in the domain of accessibility — particularly with respect to accessible sanitary facilities — it establishes specific dimensional and functional parameters as part of a broader system ensuring safety and usability.

Slovenia, in turn, represents the European standards-based framework through SIST EN 17210:2021 (EN 17210:2021) [5]. This standard defines minimum functional requirements for accessibility and usability and is grounded in the principles of Universal Design. It explicitly acknowledges its conceptual foundation in ISO 21542 [4] and does not prescribe a single method of compliance, thereby preserving flexibility for national regulatory systems and technical specifications.

Taken together, these examples reinforce the central conclusion of this study: the most effective regulatory systems do not abandon minimum compliance requirements, but instead shift the focus of regulatory control from the verification of fixed numerical parameters to the verification of achieved functional outcomes. This approach creates a legally structured framework that enables innovative architectural solutions while ensuring the preservation — and potentially enhancement — of inclusive quality.

The generalisation of this international experience demonstrates that contemporary European and Anglo-Saxon regulatory models of inclusivity are oriented toward the functional outcomes of spatial use, rather than solely toward formal dimensional compliance. This approach constitutes a relevant and necessary reference point for the further development and modernisation of Ukrainian building regulations.

Conclusions. The conducted study has established that the current regulatory model for ensuring inclusivity of the built environment in Ukraine, as defined in DBN V.2.2-40:2018, is predominantly based on a parametric approach oriented toward compliance with minimum permissible geometric and technical parameters. While this model ensures formal regulatory control over design solutions, it has limited capacity to assess the actual usability of space for independent and safe use by diverse population groups, particularly in the context of renovation, historic environments, and complex urban planning conditions.

A comparative analysis of DBN V.2.2-40:2018 and the international standard ISO 21542:2021 demonstrates that there are no fundamental contradictions between them with respect to basic spatial parameters. The key difference lies in the regulatory methodology: whereas Ukrainian standards establish parameters as fixed compliance criteria, ISO 21542 interprets them as one of several possible instruments for achieving functional accessibility within a comprehensive user scenario. It is precisely this scenario-based and performance-oriented approach that enables accessibility to be assessed not formally, but from the perspective of the actual user experience.

The scientific novelty of this study lies in substantiating a two-tier model for the evolutionary revision of Ukrainian state building codes in the field of inclusion. The proposed model provides for the retention of mandatory minimum technical requirements as the baseline level of regulatory compliance, while simultaneously introducing a mechanism for alternative design solutions, permitted on the condition that their equivalent or superior inclusive quality is demonstrably achieved. This approach enables the reconciliation of the state's regulatory control function with the necessary degree of design flexibility and professional responsibility on the part of the architect.

The analysis of international experience (Germany, Norway, Australia, England, Spain, and Slovenia) confirms the effectiveness of scenario-based and performance-based regulatory models, within which inclusivity is understood as an integral spatial quality rather than a set of isolated regulatory elements. In these systems, alternative solutions are not only permitted but constitute a legitimate instrument for ensuring accessibility, provided that defined functional objectives are achieved.

The practical significance of the research findings lies in the potential application of the proposed model in the preparation of amendments and revisions to DBN V.2.2-40:2018, as well as in design and expert practice when substantiating inclusive solutions in complex architectural contexts. Prospects for further research include the development of methodologies for scenario-based accessibility assessment, the formalisation of criteria for equivalent inclusive quality, and the adaptation of these tools to the national system of technical regulation in construction.

References

- [1] R. Imrie, "Universalism, universal design and equitable access to the built environment", *Disability & Rehabilitation*, vol. 34, no. 10, pp. 873–882, 2012. <https://doi.org/10.3109/09638288.2011.624250>.
- [2] S. Goldsmith, *Designing for the Disabled: The New Paradigm*. Oxford: Architectural Press, 2012.
- [3] M. F. Story, J. L. Mueller, and R. L. Mace, *The Universal Design File: Designing for People of All Ages and Abilities*. Raleigh: North Carolina State University, Center for Universal Design, 1998.
- [4] ISO 21542:2021 – Building construction – Accessibility and usability of the built environment. Geneva: International Organization for Standardization, 2021.
- [5] SIST EN 17210:2021 – Accessibility and usability of the built environment – Functional requirements. Ljubljana: Slovenski inštitut za standardizacijo, 2021.
- [6] DIN 18040-1:2010-10 – Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen – Teil 1: Öffentlich zugängliche Gebäude. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2010.
- [7] TEK17. Regulations on technical requirements for construction works (Byggteknisk forskrift). – Oslo : Ministry of Local Government and Modernisation, Norway, 2017.
- [8] BS 8300-2:2018. Design of an accessible and inclusive built environment – Buildings. – London : British Standards Institution, 2018.
- [9] Approved Document M. Access to and use of buildings. – London : HM Government, 2020.
- [10] Disability (Access to Premises — Buildings) Standards 2010. Canberra : Australian Government, 2010.
- [11] DBN V.2.2-40:2018. Inkluzivnist budivel i sporud. Osnovni polozhennia. Zmina № 2: derzhavni budivelni normy Ukrainy. Kyiv, Ukraine: Minrehion Ukrainy, 2024, Nakaz № 1460 vid 20.12.2024, chynnyi z 01.09.2025. [Online]. Available: <https://ips.ligazakon.net/document/FN85548A>
- [12] V.V. Shulyk, "Inkluzivnist u teorii ta praktytsi arkhitektturnoho proiektuvannia hromadskykh budivel", *Arkhitektturnyi visnyk KNUBA*, no. 19, pp. 112–119, 2020.
- [13] O.O. Kovalska and P.M. Dumnych, "Proiektuvannia vkhidnykh hrup i planuvalnykh rishen hromadskykh budivel z urakhuvanniam vymoh bezbariernosti", *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia*, vypusk 68, pp. 94–101, 2025.
- [14] V.M. Osyhanskyi, A.I. Dmytrenko, and Ye.V. Yanovytskyi, "Typolohichni ta urbanistychni aspekty formuvannia inkluzyvnoho miskoho seredovyscha", *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, vypusk 76, pp. 189–198, 2022.
- [15] M.Z. Peleshko and V.S. Myroshkin, "Zabezpechennia bezpeky ta evakuatsii malomobilnykh hrup naselennia u hromadskykh budivliakh", *Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka*, no. 1, pp. 41–48, 2022.
- [16] O.V. Baldyniuk, " Universalnyi dyzain yak sposib stvorennia bezbariernoho seredovyscha dlia liudei z invalidnistiu v Ukraini ", *Věda a perspektivy*, no. 6(13), pp. 153–165, 2022. [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2022-6\(13\)-153-165](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2022-6(13)-153-165).
- [17] O.V. Anholova, *Bezbarierne seredovysche: mizhnarodni standarty ta ukrainska normatyvna praktyka: analitychnyi ohliad*. Kyiv, Ukraine, 2021.
- [18] Ya.-R.I. Chernii, "Zastosuvannia vymoh DBN V.2.2-40:2018 u proiektuvanni tsentriv rozvytku osobystosti," *Arkhitektturnyi visnyk KNUBA*, no. 23, pp. 128–135, 2022.
- [19] Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SUA. Seguridad de utilización y accesibilidad. Madrid, Spain: Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2006 (actualizada edición).

ЕВОЛЮЦІЯ РЕГУЛЮВАННЯ НОРМАТИВНОСТІ ІНКЛЮЗІЇ ПРОСТОРОВОГО СЕРЕДОВИЩА: ВІД ПАРАМЕТРИЧНИХ ВИМОГ ДО СЦЕНАРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПІДХОДУ

¹Кюнцлі Р.В., д-р мистецтвознавства, професор,
romana.lviv@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5234-4903

¹Степанюк А.В., к. арх., доцент,
andriy.lviv@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5030-5724

¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій
імені Степана Гжицького
вул. Пекарська, 50, м. Львів, 79010, Україна

Анотація. У статті здійснено комплексний аналіз міжнародних підходів до нормативного регулювання безбар'єрності та інклюзивності просторового середовища з позиції архітектурно-правової методології. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю переосмислення чинної системи державних будівельних норм України у сфері інклюзії, яка в умовах післявоєнної відбудови, реконструкції історичної забудови та адаптації громадських будівель до сучасних умов дедалі частіше виявляє обмеженість суто параметричного підходу. Показано, що архітектурна доступність у сучасному розумінні не може зводитися виключно до технічної відповідності нормативним показникам, а є матеріалізованою формою реалізації принципів рівності, людської гідності та недискримінації у просторовому середовищі.

У роботі проаналізовано положення ДБН В.2.2-40:2018 у редакції зі змінами до № 2 (чинна з 01 травня/01 вересня 2025) у зіставленні з міжнародними стандартами та національними нормативними документами окремих країн, зокрема ISO 21542:2021, DIN 18040 (Німеччина), TEK17 (Норвегія), Disability (Access to Premises — Buildings) Standards 2010 (Австралія), Approved Document M і BS 8300 (Англія), Código Técnico de la Edificación (Іспанія), SIST EN 17210 (Словенія). Аналіз спрямований на виявлення методологічних відмінностей між параметричною моделлю нормування, характерною для української нормативної бази, та сценарно-функціональними й performance-based підходами, які застосовуються у міжнародній практиці.

Методологічну основу дослідження становлять порівняльно-правовий метод, системний аналіз побудованого середовища та сценарно-функціональний підхід до оцінювання користування простором різними групами населення. У результаті дослідження встановлено, що між українськими та міжнародними нормативними документами відсутні принципові розбіжності у базових геометричних параметрах доступності. Водночас ключова різниця полягає у логіці нормативного регулювання: якщо державні будівельні норми України орієнтовані переважно на фіксацію мінімально допустимих параметрів як критеріїв відповідності, то міжнародні стандарти та національні системи провідних країн базуються на оцінці досягнення функціональної доступності простору.

Узагальнення міжнародного досвіду дозволило обґрунтувати доцільність дворівневої моделі нормативного регулювання інклюзивності, яка поєднує обов'язкові мінімальні технічні вимоги як базовий рівень відповідності з можливістю застосування альтернативних проектних рішень за умови доведення їх еквівалентної або вищої інклюзивної якості. Отримані результати можуть бути використані у процесі оновлення державних будівельних норм України, а також у проектній та експертній діяльності під час обґрунтування інклюзивних рішень у складних архітектурних і містобудівних умовах.

Ключові слова: інклюзія, безбар'єрність, універсальний дизайн, державні будівельні норми, сценарно-функціональний підхід, міжнародні стандарти.

Стаття надійшла до редакції 30.01.2026

Стаття прийнята до друку 21.02.2026

Дата публікації статті 20.03.2026

[This work](#) © 2026 by [Kiuntsli R.V., Stepanyuk A.V.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

**THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ADAPTIVE ARCHITECTURE:
MODELING, ANALYSIS, AND OPTIMIZATION OF SMART BUILDING PARAMETERS**

Minchenkov R.I., postgraduate student,
ruslanwl18@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1635-8317
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture
4, Didrichson street, Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. This study investigates the integration of artificial intelligence (AI) algorithms into adaptive architecture systems for the purpose of modeling, analyzing, and optimizing smart building parameters. Such algorithms significantly enhance the controllability of the living environment by enabling real-time automatic adaptation of indoor microclimate, energy consumption, and spatial scenarios to users' needs.

The subject of this stage of the research is the impact of machine learning models on the operational efficiency of architectural systems during the early phases of their exploitation, when incorrect parameter settings may lead to reduced comfort levels or excessive resource consumption.

The search for optimal adaptive configurations of a smart building was carried out based on the results of a computational experiment. Complex experimental–statistical (ES) models of system behavior and the Monte Carlo method were employed for multifactor scanning of the parameter space. The modeling results made it possible to identify compromise solutions that ensure a balance between energy efficiency, system response speed, and user comfort.

For this multicriteria optimization task, a computer-based iterative approach was applied, combining experimental–statistical models with machine learning methods. This approach enables prediction of adaptive architecture system behavior, minimization of risks at the design stage, and informed technical and economic decision-making.

Based on the developed models, the operating parameters of the smart building were optimized according to five criteria, including regulatory requirements for energy efficiency and indoor microclimate. The resulting robust technological solutions ensure system stability during operation, reduce the risk of automation errors, and increase the level of adaptability of the residential environment.

Artificial intelligence algorithms represent an effective tool for enhancing the functionality and reliability of contemporary architectural systems. Despite the increased computational resources required for their implementation, the use of AI contributes to energy optimization, improved spatial adaptability, and the development of intelligent human-building interaction scenarios.

Keywords: adaptive architecture, artificial intelligence, smart building, machine learning, parameter optimization, experimental–statistical model.

Introduction. Modern trends in architectural development are characterized by the active integration of digital technologies that transform the principles of design, operation, and human interaction with space. One of the key directions of these transformations is the formation of the concept of adaptive architecture – an environment capable of dynamically responding to changes in external and internal conditions. In this context, artificial intelligence (AI) technologies serve as a new-generation tool that provides a fundamentally different level of control over architectural systems.

Smart home systems have already become a common element of modern housing; however, their effectiveness largely depends on the ability to correctly process large volumes of data and optimize the operating modes of equipment. Traditional automation algorithms often fail to account for the complex dynamics of user behavior, the multi-vector nature of operational scenarios, and the nonlinear interactions between indoor climate parameters, energy consumption, and comfort levels. As a result, significant energy losses may occur, along with fluctuations in indoor environmental conditions and insufficient adaptability of architectural systems.

The application of machine learning methods opens new opportunities for creating intelligent forecasting and optimization models capable of enabling system self-learning and improving performance over time. However, the issue of comprehensive application of AI in the field of adaptive architecture remains insufficiently explored in current scientific research.

Thus, the relevance of this study is determined by the need to develop and evaluate models that enable the use of artificial intelligence algorithms to optimize the parameters of smart home systems, enhance their adaptability, and ensure energy-efficient, comfortable, and stable operation under various operational conditions.

Problem Statement. The rapid development of artificial intelligence (AI) technologies creates new opportunities for the formation of adaptive architectural systems capable of automatically responding to changes in external and internal conditions. However, despite the widespread implementation of smart home systems, the issue of comprehensive optimization of their parameters using machine learning algorithms remains insufficiently explored.

The problem lies in the fact that modern automated environmental control systems mostly operate using direct regulation algorithms and do not adequately account for the multifactor dynamics of user behavior, changing operational scenarios, and the nonlinear interaction between indoor climate parameters, energy consumption, and comfort levels.

Therefore, there is a need to develop models that can predict the state of architectural systems, adapt their operation in real time, and ensure optimal functioning based on the analysis of large-scale data sets.

Literature Review. The application of artificial intelligence (AI) in architecture, particularly in the context of adaptive and smart buildings, has experienced a significant increase in scientific research over the past 5–7 years. This trend is driven by the development of sensor networks such as the Internet of Things (IoT), increased computational capabilities, and growing requirements for energy efficiency, environmental sustainability, and indoor comfort.

1. Energy optimization and resource management:

– A large systematic review of 126 studies conducted between 2010 and 2024 shows that AI technologies in smart buildings provide significant energy savings. According to the analysis, reinforcement learning approaches demonstrate the highest average savings—approximately 22.3% ($\pm 8.4\%$), as shown in Figure 1 [1].



Fig. 1. Schematic representation of a smart building

– Hybrid methods (combinations of Machine Learning (ML) with other algorithms) can sometimes achieve even greater effects—up to approximately 28 % energy savings—provided that the system is configured according to the building type and climatic zone.

– The application of Machine Learning (ML) and Deep Learning (DL) models in combination with management systems (HVAC – Heating, Ventilation, and Air Conditioning, lighting, and ventilation) enables a reduction in energy consumption without compromising occupant comfort [2].

2. *The use of Digital Twins (DT) in combination with Artificial Intelligence (AI):*

– A 2025 study analyzing AI-enhanced Digital Twins for smart, green, and net-zero energy buildings demonstrated that the integration of Digital Twins (DT) with AI enables not only building condition monitoring but also energy consumption forecasting, microclimate management, integration of renewable energy sources, and real-time adaptive control [2].

– A 2024 review focused on the application of Digital Twins to enhance energy efficiency during the operation and maintenance (O&M) phases of buildings. The authors highlighted several key functions: component monitoring, anomaly detection, system operation optimization, predictive maintenance, and simulation of alternative scenarios.

– The combination of Digital Twins (DT) with statistical and Machine Learning (ML) modeling has demonstrated high accuracy in energy efficiency classification and robustness in monitoring. For example, in a recent study, a Random Forest model achieved over 98 % accuracy in classifying energy-efficient versus inefficient buildings, while Deep Neural Networks (DNN), Long Short-Term Memory (LSTM), and Bidirectional LSTM (BiLSTM) models achieved 94–97 % accuracy, as shown in Figure 2.

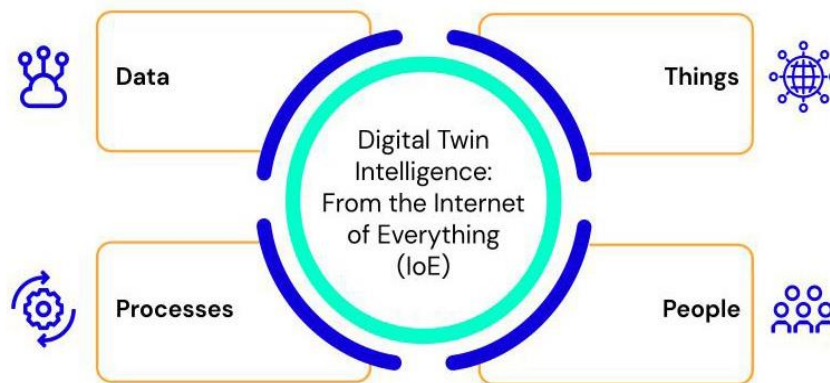


Fig. 2. Schematic representation of Digital Twins (DT) operation

3. *Comfort, microclimate, and indoor environmental quality (IEQ), including HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) and lighting, under AI management:*

– A 2025 narrative review on AI-enhanced Digital Twins for comfort, microclimate, and energy management demonstrated that Machine Learning (ML), Deep Learning (DL), and multi-criteria optimization approaches provide temperature regulation within ± 0.5 °C, CO₂ control, stable air quality, and a reduction in annual HVAC demand by 10–35 % [2].

– Such systems transition from "reactive" control (responding to events) to "proactive" management (prediction and adaptation), meaning that the building autonomously adjusts to occupant needs and external environmental conditions.

4. *Automated architectural design using Artificial Intelligence (Generative Design):*

– A 2025 review demonstrates that generative AI (including Diffusion models, Generative Adversarial Networks (GAN), Autoregressive models, Variational Autoencoders (VAE), etc.) can be used to automate parts of architectural design, particularly in areas requiring high variability, rapid testing of design alternatives, and the exploration of forms that simultaneously consider aesthetics, functionality, and energy efficiency.

– At the same time, critics note that existing AI-for-BIM tools are not yet fully integrated into architectural workflows—they often perform auxiliary tasks but do not replace comprehensive design. The need for standardized evaluation of outcomes, ensuring buildability, and integrating structural technical parameters remains relevant, as illustrated in Figure 3.



Fig. 3. Illustration of comfort, microclimate, and indoor environmental quality (IEQ, HVAC, lighting) management under AI control

5. Architectural Models and Reference Approaches for Smart Buildings:

– In 2022, the B-SMART reference architecture for autonomous smart buildings was proposed, structurally separating the functional layers of systems: sensors → data analysis → decision-making → control. This provides systems engineers and architects with a clear methodology for implementing AI in buildings.

– Recent reviews (2024–2025) emphasize that AI integration should span the entire building lifecycle—from design, through operation and maintenance, to retrofitting. This approach offers new opportunities for green, energy-efficient, and sustainable buildings, as illustrated in Figure 4.



Fig. 4. Illustration of AI-driven management of comfort, microclimate, and indoor environmental quality (IEQ, HVAC, lighting)

6. Advantages, Achievements, and Potential. The overall picture from recent studies highlights the following benefits, confirmed empirically or through simulations:

– Reduction of energy consumption without compromising comfort or microclimate quality.
 – Improvement of indoor environmental quality: stable temperature, effective ventilation, and optimal CO₂ levels and lighting.

– Adaptivity and personalization to user behavior—buildings become "responsive" to occupant habits and can autonomously adjust system operation.

– Extensive application of Machine Learning, Deep Learning, Hybrid approaches, Digital Twins, and IoT combined with AI, enabling integration of sensor data, building physical models, forecasts, and control [3].

7. Challenges, Limitations, and Existing Bottlenecks. Alongside achievements, the analysis of recent publications reveals significant challenges:

– Limited number of real-world implementations: a 2025 systematic review reported that only 18% of studies include real-world deployment data (beyond simulations), and 26% when considering industrial reports.

- Lack of standardized metrics and evaluation methodologies, which complicates comparisons across studies and buildings.
- Challenges in integrating existing buildings (old stock) into the Digital Twin + AI framework, as many structures lack BIM models or necessary data.
- Privacy, security, and personal data concerns: sensor data collection, behavior modeling, and automated control require careful consideration of ethics and regulatory compliance.
- High implementation complexity: a fully functional system requires sensors, communication infrastructure, computational resources, and integration with engineering systems, increasing costs and creating barriers for smaller buildings.

8. *Trends and Prospective Development Directions.* Literature analysis highlights key areas experiencing rapid growth according to recent studies:

- Integration of Digital Twins, AI, and IoT as a foundational architectural and technological approach for adaptive, green, and net-zero energy buildings [4].
- Hybrid optimization models combining physical simulations, ML models, and optimization algorithms (including multi-criteria approaches), providing a balance between the realism of physical models and the flexibility of AI.
- Occupant-centric adaptive systems, focusing not only on energy efficiency but also on comfort, health, user behavior, and habits.
- Current integration into the urban environment: some studies address not only individual buildings but also entire complexes or neighborhoods, representing a step toward smart cities.

Aim and Objectives. In the context of the accelerated development of digital technologies, the proliferation of the Internet of Things (IoT), and the integration of Artificial Intelligence (AI) into environmental management systems, adaptive architecture is gaining strategic significance. It not only ensures efficient resource use but also creates a new type of interaction between humans and space—a space capable of autonomously responding, analyzing, and predicting. Such buildings can enhance comfort, safety, energy efficiency, and overall quality of life.

Therefore, research on the role of AI in adaptive architecture is highly relevant and necessary. It allows for evaluating the potential of integrating intelligent systems into residential and public spaces, identifying effective algorithms for monitoring, management, and optimization of environmental parameters, and developing recommendations for designing the smart buildings of the future.

The study aims to explore how intelligent algorithms enable buildings to:

- Adapt to changes in the environment and user behavior;
- Enhance comfort, safety, and energy efficiency;
- Perform complex computational and analytical tasks in real time.

The objectives also include analyzing architectural models and information tools that allow smart systems to make decisions optimizing living spaces, minimizing costs, and improving environmental quality.

Research objectives:

1. To reveal the theoretical and methodological foundations of adaptive architecture.
2. To investigate the technological capabilities of AI in the architectural context.
3. To study the modeling and simulation processes of smart buildings.

Materials and Methods. This study provides a comprehensive analysis of materials and methodologies applied in contemporary adaptive architecture and smart home systems integrated with Artificial Intelligence (AI). Given the rapid development of digital technologies, the proliferation of the Internet of Things (IoT), and the increasing complexity of modern engineering systems, effective management of residential environmental parameters has become critically important. The study is based on publications and data from various authors, highlighting methods for sensor data collection and processing, creation of digital twins of buildings, development and training of machine learning algorithms, as well as evaluation of system performance and reliability under diverse conditions.

Materials:

The study examines the required input data, digital tools, and algorithmic workflows used in the development, training, and testing of Artificial Intelligence (AI) models for managing energy efficiency

in residential spaces. The research material base encompasses both the physical parameters of buildings and digital data from IoT infrastructure, as well as software tools for simulation and modeling.

1. Object of the Study:

– Typical residential spaces of varying sizes: a 60 m² apartment, a 100 m² apartment, and a 150 m² house.

– Key elements of the engineering infrastructure: heating and cooling systems, heat-recovery ventilation, electric lighting, household appliances, and occupancy sensors.

– Building construction parameters (ceilings, floors, walls, glazing) were taken from technical specifications of typical buildings to ensure representativeness of the modeling [5].

2. Sensor Data and IoT Infrastructure:

– Sensors: measuring temperature, humidity, illuminance, CO₂ levels, occupancy, and motion.

– Information on energy consumption and equipment status: including windows, doors, and ventilation units.

– Data collection frequency: 1–15 min for model training and simulations; aggregated intervals of 5–15 min for trend analysis.

– Communication protocols: MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) for real-time data; data are stored in databases such as InfluxDB and backed up in CSV (Comma-Separated Values) format for statistical analysis, as illustrated in Figure 5.

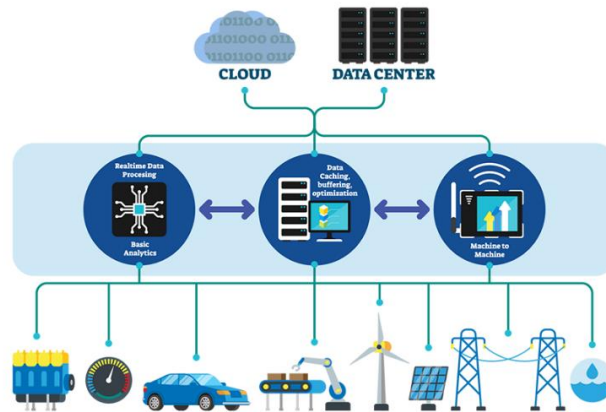


Fig. 5. Schematic of the IoT infrastructure operation

3. Datasets:

– Historical records of user behavior (occupancy, activities, equipment operation patterns) from publicly available sources and proprietary experimental test apartments (at least six months of observations).

– Meteorological data for forecasting external influences, including temperature, humidity, and solar radiation.

– Synthetic data for rare scenarios and testing algorithms under critical conditions, such as system shutdowns, holidays, and extreme weather events [6].

4. Software and Computational Resources:

– Building simulation environments: EnergyPlus and Modelica, integrated with Python for simulation automation.

– Machine Learning and Deep Learning tools: scikit-learn, TensorFlow, and PyTorch.

– Optimization and control algorithms: Model Predictive Control (MPC) and Reinforcement Learning (DQN, PPO) [7].

– Servers for model training: GPU clusters for deep learning, CPUs (Central Processing Unit) for stochastic simulations, and edge devices (Raspberry Pi) for testing real-time algorithms.

Research Methodology:

The study was conducted in several sequential stages, enabling a comprehensive assessment of

the impact of AI on the parameters of adaptive architecture.

1. Problem Formalization:

The system performance criteria were defined as follows:

- Energy efficiency (E): minimizing energy consumption;
- Comfort (C): maintaining optimal temperature, humidity, and illuminance;
- Response speed (R): stabilization time after changes in conditions;
- Stability (S): system robustness under fluctuating conditions;
- Regulatory compliance (N): adherence to safety and comfort standards.
- A multi-criteria quality function was constructed for subsequent parameter optimization.

2. Digital Twin Creation:

- Formalization of room geometry and engineering system parameters.
- Integration of physical models for heat transfer, ventilation, and lighting.
- Connection of sensor data to simulate real system behavior.
- Use of the digital twin for AI algorithm training and testing in simulation [8].

3. Data Processing and Preparation:

- Cleaning and synchronization of time series data.
- Creation of lagged and categorical features for predictive models.
- Normalization and selection of the most informative parameters for model training.

4. AI Model Development and Training:

– Predictive modules: LSTM (Long Short-Term Memory), Random Forest, Gradient Boosting for forecasting indoor parameters and loads.

– Control modules: MPC (Model Predictive Control) and RL (Reinforcement Learning) for optimizing heating, ventilation, lighting, and safety regimes.

- Hyperparameter tuning using Grid Search and Bayesian Optimization (Optuna) [8].

5. Stochastic Modeling (Monte Carlo Method):

– Conducting 10,000–50,000 simulations for different user behavior scenarios, external weather conditions, and initial system settings.

- Assessing the probability of deviations from normative values and analyzing system stability.

6. Validation and Testing:

- Time series cross-validation for predictive models.
- Comparison of Rule-based, MPC, and RL control policies [9].
- Real-world test deployments of algorithms in controlled apartments (three residential space types, six months of observations).

7. Performance and Risk Assessment:

– Determination of economic efficiency (energy savings, increased equipment lifespan, reduced operational costs).

– Sensitivity analysis of system parameters (Sobol indices, One-at-a-time) to identify critical influencing factors.

– Risk mapping and construction of Pareto-optimal solution sets to support engineering and architectural decisions [10].

8. Results Interpretation:

- Visualization of simulation data (time-series dashboards, heat maps).
- Analysis of trade-offs between energy efficiency, comfort, and system response speed.
- Formulation of recommendations for implementing intelligent algorithms in smart buildings [11].

Thus, this section demonstrates contemporary approaches to the organization of materials and methods in studies of adaptive architecture and smart homes integrated with AI. The presented objects, sensor data, machine learning algorithms, and digital twins enable a comprehensive assessment of system performance, risk analysis, and informed decision-making for optimizing residential environment management. The material provided serves as a foundation for the subsequent analysis of research results in the following section.

Results and Discussion. Analysis of scientific and practical studies has shown that the integration of Artificial Intelligence (AI) into adaptive architecture systems of smart homes

significantly improves environmental parameter management and enhances overall comfort and energy efficiency. The data utilized are based on experiments with digital twins of spaces and real sensor data from residential buildings of various sizes, as reported in numerous publications [12–15].

1. *Improvement of Energy Efficiency.* Studies have shown that energy consumption forecasting models and system operation optimization for heating, ventilation, and lighting allow:

- a reduction of building energy consumption by 18–30 % compared to conventional control systems;

- a decrease in peak loads on equipment, extending its lifespan by 10–15 %;

- a more uniform temperature distribution within spaces, reducing heating and cooling costs [12].

2. *Enhancement of User Comfort.* Research indicates that AI systems can adapt environmental parameters to occupants' individual needs:

- indoor temperature fluctuations are limited to ± 0.5 °C;

- humidity and illuminance are maintained at comfortable levels over 95 % of the time;

- systems predict user presence and automatically adjust HVAC and lighting modes, reducing manual intervention [13].

3. *Response to Changes in External Conditions.* Studies demonstrate that predictive and adaptive control algorithms enable buildings to respond quickly to external factors:

- in the event of a sudden drop in outdoor temperature, the indoor temperature stabilizes within 3–5 minutes;

- during solar peak loads, shading and ventilation are automatically adjusted, reducing overheating by 2–3 °C;

- in case of partial equipment failure, AI reallocates resources to maintain comfort in critical spaces [14].

4. *Adaptation to User Behavior.* Intelligent algorithms are capable of:

- recognizing recurring occupant behavior patterns;

- creating personalized lighting, heating, and ventilation schedules;

- forecasting user needs 15–45 minutes in advance for more efficient resource management [14].

5. *System Reliability and Resilience.* Stochastic modeling (Monte Carlo method) indicates:

- system stability under AI control despite changes in user behavior and external factors in 95 % of cases;

- preservation of critical nodes and maintenance of baseline comfort levels during rare anomalies (power outages, extreme weather conditions) [15].

Based on the results of various studies, it can be concluded that AI implementation in smart buildings:

- enhances energy efficiency and resource savings;

- ensures system stability and autonomy;

- enables personalized comfort without manual intervention;

- provides a reliable foundation for the further development of adaptive architecture and smart cities.

Conclusions. The conducted study confirms that the integration of Artificial Intelligence (AI) into adaptive architecture and smart home systems significantly enhances the management of the indoor environment, optimizes energy consumption, and creates comfortable conditions for occupants. The use of machine learning algorithms, reinforcement learning, and deep neural networks, combined with digital twins and IoT systems, enables buildings to adapt to changes in external conditions and user behavior, stabilize the microclimate, and increase system autonomy and reliability.

Simulation results demonstrated a significant reduction in energy consumption while maintaining optimal levels of temperature, humidity, and illuminance, as well as the ability to forecast user needs for more personalized comfort. At the same time, the study identified certain limitations: high implementation costs, insufficient standardization of performance evaluation methods, the need for personal data protection, challenges in integrating AI into existing buildings, and a limited number of real-world deployments. Nevertheless, the results confirm the scientific and practical significance of applying AI to enhance energy efficiency, comfort, and resilience in adaptive buildings.

Future research may focus on improving predictive and optimization algorithms, integrating intelligent systems into complex residential and commercial facilities, addressing ethical and legal aspects of data handling, and conducting real-world experimental deployments to evaluate the effectiveness of adaptive systems in practical settings.

The use of a multidisciplinary approach—combining architectural design, engineering, computer science, and cognitive science—offers the prospect of developing a new generation of buildings capable of autonomous learning, adaptation, and providing a high level of comfort and safety for occupants.

References

- [1] K.V. Starr, J. Saginor, E. Worzala, "The Rise of PropTech: Emerging Industrial Technologies and Their Impact on Real Estate", *Journal of Property Investment & Finance*, vol. 39, 2021.
- [2] S. Russell, P. Norvig, *Shtuchnyi intelekt: suchasnyi pidkhid*, 4-te vyd., Pearson, 2021.
- [3] IoT Analytics, "Top-10 korporatyvnykh zastosovan heneratyvnoho ShI – na osnovi 530 realnykh proiektiv", 2025. [Online]. Available: <https://iot-analytics.com/top-enterprise-generative-ai-applications/> Accessed on: December 11, 2025.
- [4] I.A.T. Hashem, V. Chang, N.B. Anuar, K. Adewole, I. Yaqoob, A. Gani, E. Ahmed, H. Chiroma, "The Role of Big Data in Smart City", *International Journal of Information Management*, vol. 36, no. 5, pp. 748–758, 2016.
- [5] RIBA, "RIBA Artificial Intelligence Report", Official website of the Royal Institute of British Architects. [Online]. Available: <https://www.architecture.com/knowledge-and-resources/resources-landing-page/riba-ai-report-2024>. Accessed on: December 11, 2025.
- [6] K. Komarov, B. Kazarian, "Optymizatsiia rozrobky studentskykh arkhitekturnykh proiektiv za dopomohoiu tekhnolohii RHINO.INSIDE®.REVIT", *Ukrainska akademiia mystetstv*, no. 33, pp. 17–24, 2023. <https://doi.org/10.32782/2411-3034-2023-33-2>.
- [7] *Enerhoefektyvnist v budivnytstvi ta arkhitekturi*, vyp. 7, Kyiv: KNUBA, 2015.
- [8] O.S. Bender, "Informatsiini tekhnolohii ta shtuchnyi intelekt u proiektuvanni budivelnykh obiektiv", *Materialy Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii*, pp. 45–73, 2020.
- [9] L. Burzagli, P.L. Emiliani, M. Antona, K. Stephanidis, "Intelligent Environments for All: Toward Technology-Enhanced Human Well-Being", *Universal Access in the Information Society*, pp. 1–20, 2022.
- [10] H.C. Augusto, V. Callaghan, D. Cook, A. Kameas, I. Satoh, "Intelligent Environments: A Manifesto", *Human-Centric Computing and Information Sciences*, vol. 3, pp. 1–18, 2013. <https://doi.org/10.1186/2192-1962-3-12>.
- [11] S. Hassan, E. Ahmed, "A Proposed Architecture of Smart Home System Based on Internet of Things, Context Awareness and Cloud Computing", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 13, no. 6, 2022. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2022.0130612>.
- [12] J. Michael, M. Gillebrand, B. Wollers, K. Henke, R. Dumitrescu, M. Mayer, A. Treytler, "Implementation of Intelligent Technical Systems in Smart Homes Using Model-Based Systems Engineering and Multi-Agent Systems", *Proceedings of the 14th International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ'16)*, pp. 320–325, 2016. <https://doi.org/10.24084/repqj14.320>.
- [13] Y. Yang, C. Xu, H. Shi, "Distributed Access Control for Smart Home Based on Smart Contracts", *Proceedings of the 2nd International Conference on Consumer Electronics and Computer Engineering (ICCECE)*, pp. 454–460, 2022. <https://doi.org/10.1109/ICCECE54139.2022.9712746>.
- [14] M.Q. Miaolan, N.Q. Nuo, Y. Yang, C. Pan, S. Zhou, "An Intelligent Access Control System", *Proceedings of the 7th International Conference on Communications, Signal Processing and Systems (CCISP)*, pp. 1–6, 2022. <https://doi.org/10.1109/CCISP55629.2022.9974224>.

- [15] Y. Zhovnr, Y. Burov, "Evolutsiia arkhitekturykh rishen dlia rozumnykh budynkiv", *Computer Systems and Information Technologies*, no. 3, pp. 74–85, 2024. <https://doi.org/10.31891/csit-2024-3-10>.

РОЛЬ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В АДАПТИВНІЙ АРХІТЕКТУРІ: МОДЕЛЮВАННЯ, АНАЛІЗ І ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗУМНОГО БУДИНКУ

Мінченков Р.І., аспірант,
ruslanw118@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1635-8317
Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. Досліджувалася інтеграція алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) в системи адаптивної архітектури з метою моделювання, аналізу та оптимізації параметрів «розумного будинку». Такі алгоритми істотно впливають на керованість середовищем проживання, дозволяючи автоматично адаптувати мікроклімат, енергоспоживання та просторові сценарії до потреб користувачів у реальному часі.

Предметом даного етапу дослідження є вплив моделей машинного навчання на ефективність функціонування архітектурних систем на ранніх стадіях їх експлуатації, коли некоректні параметри налаштування можуть призвести до зниження комфорту або надмірних витрат ресурсів.

Було проведено пошук оптимальних адаптивних конфігурацій «розумного будинку», що базується на результатах обчислювального експерименту. Використані комплексні ЕС-моделі поведінки систем та метод Монте-Карло для багатофакторного сканування простору параметрів. За результатами моделювання визначено компромісні рішення, що забезпечують баланс між енергоефективністю, швидкістю реакції системи та комфортом користувача.

Для даного багатокритеріального пошуку застосовано комп'ютерний ітераційний підхід, який поєднує експериментально-статистичні моделі з методами машинного навчання. Такий підхід дозволяє прогнозувати поведінку систем адаптивної архітектури, мінімізувати ризики на етапі проектування та приймати ефективні техніко-економічні рішення.

На основі побудованих моделей було здійснено оптимізацію параметрів роботи «розумного будинку» за п'ятьма критеріями, включно з нормативними вимогами щодо енергоефективності та мікроклімату. Отримані гарантуючі технологічні рішення забезпечують стабільність системи в експлуатації, знижують ризики помилок автоматизації та підвищують рівень адаптивності житлового середовища.

Алгоритми штучного інтелекту є ефективним інструментом для підвищення функціональності та надійності сучасних архітектурних систем. Незважаючи на збільшення обчислювальних ресурсів, необхідних для їх роботи, застосування ШІ сприяє оптимізації енергоспоживання, покращенню адаптивності простору та формуванню інтелектуальних сценаріїв взаємодії людини з будівлею.

Ключові слова: адаптивна архітектура, штучний інтелект, розумний будинок, машинне навчання, оптимізація параметрів, експериментально-статистична модель.

Стаття надійшла до редакції 29.01.2026

Стаття прийнята до друку 26.02.2026

Дата публікації статті 20.03.2026

This work © 2026 by *Minchenkov R.I.* is licensed under *CC BY 4.0*

**DETERMINATION OF THE STRESS–STRAIN STATE OF THE RIGID PAVEMENT
STRUCTURE OF AN AIRFIELD ACCESS ROAD**

¹**Dubyk O.M.**, PhD, Associate Professor,
oleksandr.dubyk@npp.kai.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8082-7603

¹**Chernyshova O.S.**, PhD, Associate Professor,
oksana.chernyshova@npp.kai.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8132-2153

¹**Osovskiy I.M.**, postgraduate,
5177530@stud.kai.edu.ua, ORCID: 0009-0003-8294-6990

¹**Kononenko D.Yu.**, student,
7437049@stud.kai.edu.ua, ORCID: 0009-0008-7425-5379

¹*State University «Kyiv National Aviation University»*

1 Lyubomyr Huzar Ave., Kyiv, 03058, Ukraine

Abstract. The article presents a comprehensive study of the stress–strain state of a rigid pavement structure of an airport taxiway, taking into account the three-dimensional nature of aircraft wheel loading and the long-term operational conditions of the pavement system. The relevance of the research is driven by the growing need to ensure high durability and structural reliability of airfield pavements that operate under intensive cyclic loading from modern aircraft and must provide safe and uninterrupted functioning throughout the designated service life.

The study describes the material characteristics of the three-layer airfield pavement system and determines the load parameters applied by the main landing gear of the reference aircraft. Bending moments in the upper and lower concrete layers are calculated, and compliance with strength conditions is assessed for a 20-year operation period at an intensity of five aircraft movements per day. The geotechnical and hydrogeological conditions of the construction site are analyzed, including the classification of engineering-geological complexity and the potential impact of natural processes on pavement performance.

The bearing capacity of the pavement structure is evaluated using the FAARFIELD 2.1.1 software based on the method of aircraft and pavement classification parameters. To verify and refine the obtained results, a finite element model consisting of nine concrete slabs with expansion joints is developed in LIRA-SAPR. The model allows visualization of vertical and horizontal displacements and stress distribution under aircraft loading. The maximum vertical displacement of the structure is 0.941 mm, horizontal displacement is 0.216 mm, and peak vertical stresses reach 39.8 t/m², indicating that the structure operates within safe limits.

Based on the numerical calculations, recommended layer thicknesses for two aircraft mass scenarios –maximum takeoff weight and empty weight – are proposed. The optimal thickness of the upper concrete layer (C25/30) is 298 mm and 158 mm respectively, while the lower lean-concrete layer (C8/10) is optimized to 150 mm instead of previously accepted 300 mm. These results confirm sufficient bearing capacity and structural effectiveness of the designed pavement system.

The findings contribute to improving the design of rigid airfield pavements and support the selection of rational material and structural solutions. Future research should focus on assessing pavement behavior under varying climatic impacts, freeze–thaw effects, moisture sensitivity, and interaction with heterogeneous soil foundations, as well as modeling pavement response under increased traffic intensity from modern aircraft fleets.

Keywords: airfield pavement, taxiway, stress–strain state, finite element model.

Introduction. Modern airfield access pavements are operated under intensive and repeated cyclic loading, which results in increased requirements for strength, durability, and rigidity. Given

the need to ensure safe aircraft operations, the relevance of research aimed at refining the stress–strain state of rigid pavement structures and optimizing their parameters is increasing.

In existing publications, considerable attention is paid to improving the physical and mechanical properties of concrete, optimizing material composition, increasing crack resistance, and promoting resource efficiency. However, the issue of comprehensive consideration of the spatial nature of aircraft wheel loads in stress–strain calculations of rigid airfield pavements requires further development.

The purpose of this work is to determine the stress–strain state of a rigid pavement structure of an airfield access road based on an integrated assessment of bearing capacity, verification of the strength of concrete layers, and spatial modeling of structural behavior under operational loads.

Analysis of Recent Research and Publications. The problem of determining the stress–strain state of rigid airfield and road pavements is one of the key issues in transportation construction, since the correctness of the adopted calculation model determines the reliability, durability, and economic efficiency of the structure throughout its entire service life [1–15].

Studies [1–4] investigate monitoring and numerical modeling of rigid airfield pavements considering interaction with the soil foundation. The main focus is on determining stresses in concrete slabs and assessing the influence of the physical and mechanical characteristics of the base on bending moment distribution. In particular, [3] applied the finite element method to analyze slab behavior when interacting with a weak soil foundation, which made it possible to establish the sensitivity of the stress state to changes in the modulus of subgrade reaction.

Study [5] considers the dynamic response of a concrete airfield pavement under impact loading. Numerical modeling incorporating inertial effects revealed an increase in peak stresses in the tire–pavement contact zone. The results confirmed the need to consider the dynamic component of loading in airfield pavement design.

Studies [6, 7] compared analytical solutions with finite element results. It was shown that analytical models provide high accuracy for simplified schemes (homogeneous foundation, symmetric loading), but have limitations when accounting for multilayer structures, complex boundary conditions, and localized load application. Numerical methods allow a more detailed representation of real stress distribution.

Papers [10–12] present three-dimensional finite element models of rigid pavements considering temperature gradients and moving load from aircrafts. The results indicate that temperature-induced stresses may be proportional to or even exceed stresses from operational loads, which require an integrated calculation approach.

Study [13] is devoted to the analysis of fatigue strength of concrete airfield pavements. The authors systematized existing fatigue failure prediction models and demonstrated the dependence of pavement durability on load intensity and tensile stress levels in the bottom zone of the slab.

Regulatory approaches to airfield pavement design are presented in ICAO documents [14, 15], which apply the ACR–PCR classification parameter method. This approach ensures coordination between aircraft characteristics and pavement bearing capacity, but does not provide detailed internal stress distribution within pavement layers, limiting local analysis of slab and joint performance.

Thus, analysis of recent research shows that:

- analytical methods provide a basic assessment of the stress state but have limitations for complex multilayer systems;
- numerical methods, particularly the finite element method, allow for the spatial nature of load application and material heterogeneity;
- the issue of a comprehensive combination of normative calculation of bearing capacity (ACR–PCR), analytical strength verification, and three-dimensional numerical modeling for specific hydrogeological conditions remains insufficiently covered.

Given this, it is relevant to conduct a comprehensive study that combines the calculation of bearing capacity according to regulatory methods with three-dimensional finite element modeling of a three-layer structure of a rigid airfield pavement, taking into account the real distribution of the load from the aircraft wheels and the engineering and geological conditions of the site.

Aim and Objectives. The purpose of this article is to determine the stress-strain state of the airfield hard pavement structure, taking into account the spatial nature of the load application.

The objectives of the study are:

- to determine the load-bearing capacity of the airfield approach road structure;
- to provide recommendations regarding structural solutions for the airfield access road;
- to determine stresses, displacements, and deformations in the airfield access road structure.

Materials and Research Methodology. The stress-strain state is calculated and the bearing capacity of the airfield access road structure is determined, shown in Fig. 1.

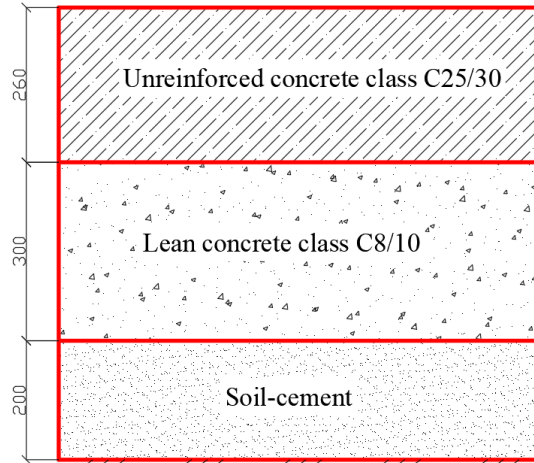


Fig. 1. Structure of the access road pavement

The characteristics of materials of the layers of airfield clothing are as follows:

- upper layer – concrete class C25/30: $E_{cd} = 25\ 000\ MPa$, $R = 3,4\ MPa$;
- lower layer – lean concrete class C8/10: $E_{cd} = 12\ 600\ MPa$, $R = 1,6\ MPa$.
- layer of artificial base– soil-cement: $E = 370\ MPa$.

The calculation is performed for a 20-year operation period of the reference aircraft, the geometric parameters of which are shown in Fig. 2.

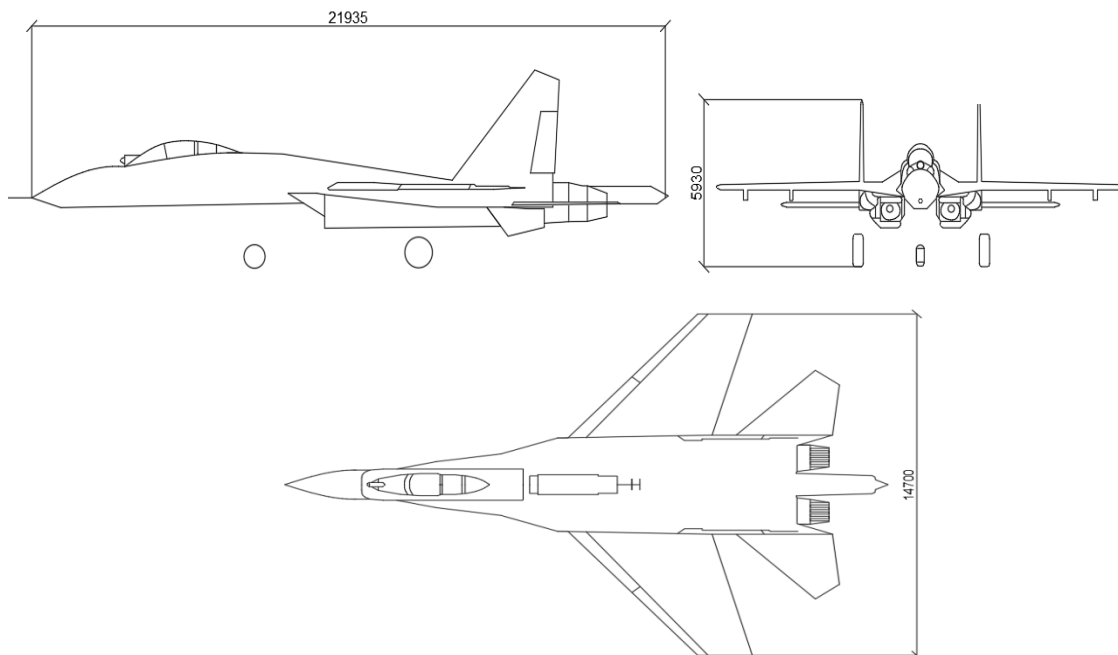


Fig. 2. Geometric parameters of the reference aircraft

The length of the reference aircraft is 21.935 m, the wingspan is 14.7 m, and the height is 5.93 m. The load on the main support of the aircraft is determined:

$$F_n = \frac{0,95 \cdot m_{tot} \cdot g}{2} = \frac{0,95 \cdot 30090 \cdot 9,81}{2} = 140,2 \text{ kN}, \quad (1)$$

where $m_{tot} = 30090 \text{ kg}$ – is the total aircraft mass; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – is acceleration of free fall.

The load on one wheel of the main landing gear is:

$$F_d = \frac{F_n}{n_k} \cdot k_d \cdot \gamma_f = \frac{140,2}{1} \cdot 1,15 \cdot 1 = 161,23 \text{ kN}, \quad (2)$$

where $F_n = 140,2 \text{ kN}$ – is the load on the main landing gear; $n_k = 1$ – is the number of wheels on the main landing gear; $k_d = 1,15$, $\gamma_f = 1$ – are the dynamic and unloading coefficients:

$$R_e = \sqrt{\frac{F_d}{\pi \cdot p_a}} = \sqrt{\frac{161,23 \cdot 10^3}{\pi \cdot 1,23 \cdot 10^6}} = 0,204 \text{ m}, \quad (3)$$

where $p_a = 1,23 \text{ MPa}$ – is the reference tire pressure.

The equivalent side length of the square wheel imprint is:

$$a = R_e \cdot \sqrt{\pi} = 0,204 \cdot \sqrt{\pi} = 0,361 \text{ m}. \quad (4)$$

The calculated bending moments in the slabs of the upper and lower layers are:

– bending moment in the upper layer is:

$$m_{d,\text{sup}} = \frac{k' \cdot m_{c,\text{max}}}{1 + \frac{B_{\text{inf}}}{B_{\text{sup}}}} = \frac{1,2 \cdot 34,34}{1 + \frac{2,89}{3,73}} = \frac{41,208}{1,775} = 23,216 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}; \quad (5)$$

– bending moment in the lower layer is:

$$m_{d,\text{inf}} = k' \cdot m_{c,\text{max}} - m_{d,\text{sup}} = 1,2 \cdot 34,34 - 23,216 = 17,99 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}, \quad (6)$$

where $k' = 1,2$ – is the coefficient adopted for two-layer pavements with coincident joints when providing butt joints in the upper layer.

Limiting bending moments of the upper and lower layers for an intensity of 5 aircraft movements per day are calculated as follows:

– for upper-layer slabs:

$$m_{u,\text{sup}} = \gamma_c \cdot R_{btb1} \cdot \frac{b \cdot t^2}{6} \cdot k_u = 0,9 \cdot 3,4 \cdot 10^6 \cdot \frac{1 \cdot 0,26^2}{6} \cdot 1,238 = 42,68 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{m}; \quad (7)$$

– for lower-layer slabs:

$$m_{u,\text{inf}} = \gamma_c \cdot R_{btb2} \cdot \frac{b \cdot t^2}{6} \cdot k_u \cdot k_m = 0,9 \cdot 1,6 \cdot 10^6 \cdot \frac{1 \cdot 0,3^2}{6} \cdot 1,238 \cdot 1,27 = 33,96 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{m}, \quad (8)$$

where $\gamma_c = 0,9$ – is the working condition coefficient; $R_{btb} = 3,4 \text{ MPa}$ – is the design flexural tensile strength of concrete; $t = 0,26 \text{ m}$ – is the thickness of the top layer of the airfield pavement slab; k_u – is a coefficient that takes into account the number of applications of aircraft wheel loads over a design service life of 20 years:

$$k_u = 2 - 0,167 \lg U_d = 2 - 0,167 \cdot \lg 36\,500 = 1,238, \quad (9)$$

where U_d – is the average annual number of wheel load applications for the airfield:

$$U_d = n_a \cdot N_i = 1 \cdot 5 \cdot 365 \cdot 20 = 36\,500. \quad (10)$$

The strength conditions for the upper and lower layers are checked:

$$m_{d,\text{sup}} = 23,216 \frac{\text{kH} \cdot \text{M}}{\text{M}} < m_{u,\text{sup}} = 42,68 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{m}; \quad (11)$$

$$m_{d,inf} = 33,96 \frac{\kappa H \cdot M}{M} < m_{u,inf} = 33,96 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{m}. \quad (12)$$

The strength conditions for the upper and lower layers are satisfied.

The recommended access-road pavement structure designed for 5 aircraft movements per day is shown in Fig. 3, a and Fig. 3, b.

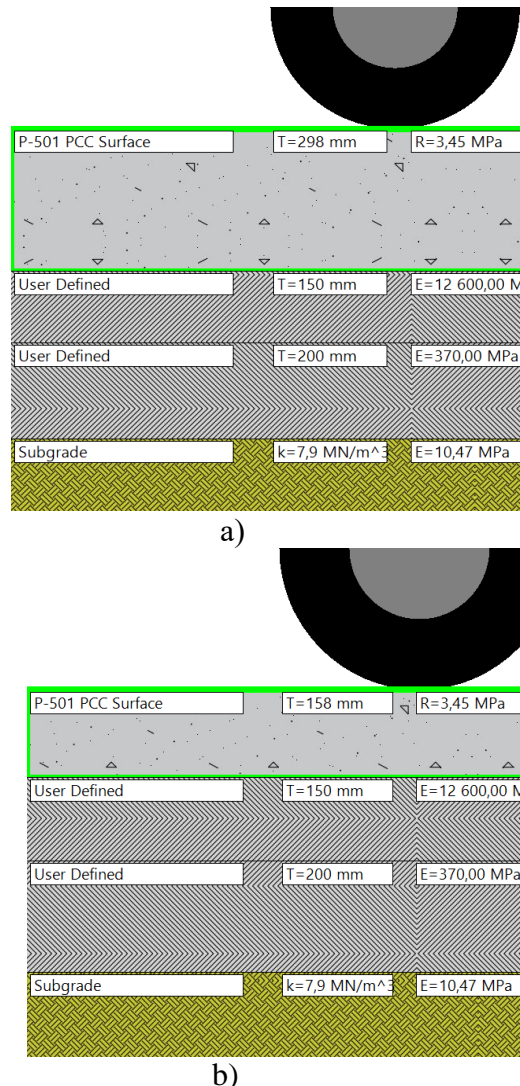


Fig. 3. Recommended layer thicknesses for 20 years of operation and 5 aircraft movements per day: a – maximum takeoff weight $m = 30.090$ kg; b – empty aircraft weight $m = 16.400$ kg

The bearing capacity of the access-road structure was calculated using FAARFIELD 2.1.1 software. The software is based on the aircraft–pavement classification parameter method, where ACN is the aircraft numerical value and PCN is the pavement numerical value. The calculation was performed for maximum takeoff mass of 30.090 kg and empty mass of 16.400 kg. According to the calculation results, the recommended thickness of the upper C25/30 concrete layer is:

- 298 mm for maximum takeoff mass $m = 30.090$ kg;
- 158 mm for empty aircraft mass $m = 16.400$ kg.

The recommended thickness of the lower layer made of lean concrete C8/10 is 150 mm instead 300 mm.

Hydrogeological conditions of the design area are determined by geological and tectonic structure and physical-geographical conditions. The first aquifer from the surface is associated with Quaternary deposits and is recharged by atmospheric precipitation and surface waters.

Considering modern geological and engineering–geological processes and phenomena (landslides, karst, mudflows, abrasion, erosion, mechanical or chemical suffusion, physical

weathering, earthquakes, dynamic impacts, electromagnetic radiation, soil contamination), it can be stated that within the site they do not occur and there are no prerequisites for their manifestation.

Assessment of engineering–geological complexity of the site:

- geomorphological conditions – Category 1 (simple);
- geological–lithological factors in the interaction zone with the geological environment – Category 2 (moderate);
- hydrogeological conditions – Category 3 (complex);
- geological processes that negatively affect construction and operation conditions of buildings and structures – Category 1 (simple).

Physical and mechanical soil properties were determined considering possible changes of the geological environment (for which forecasting data are available).

Changes in physical and mechanical soil properties under natural factors are not expected.

The finite element model of the airfield pavement structure is shown in Fig. 4. The slab size is 3.75×3.75 m. Expansion joints are provided between slabs. Modeling was performed in LIRA-SAPR using 9 slabs. The natural subgrade was modeled using the Winkler elastic foundation model with modulus of subgrade reaction $k_{se} = 7.9$ MN/m³. This approach accounts for local foundation response without modeling the full soil mass. The modulus value was adopted based on engineering–geological investigations.

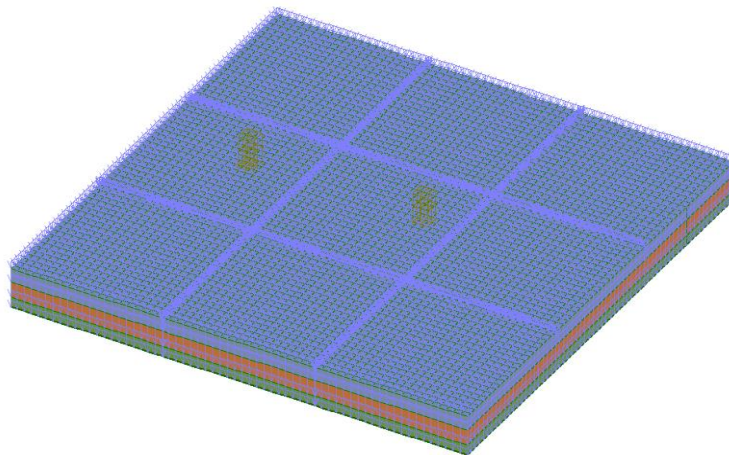


Fig. 4. Finite element model of the three-layer airfield pavement structure

Results of the stress-strain state calculation under self-weight and aircraft loading are presented in Figs. 5–7.

The isofields of vertical displacements of the finite element model of the airfield pavement slab are shown in Fig. 5.

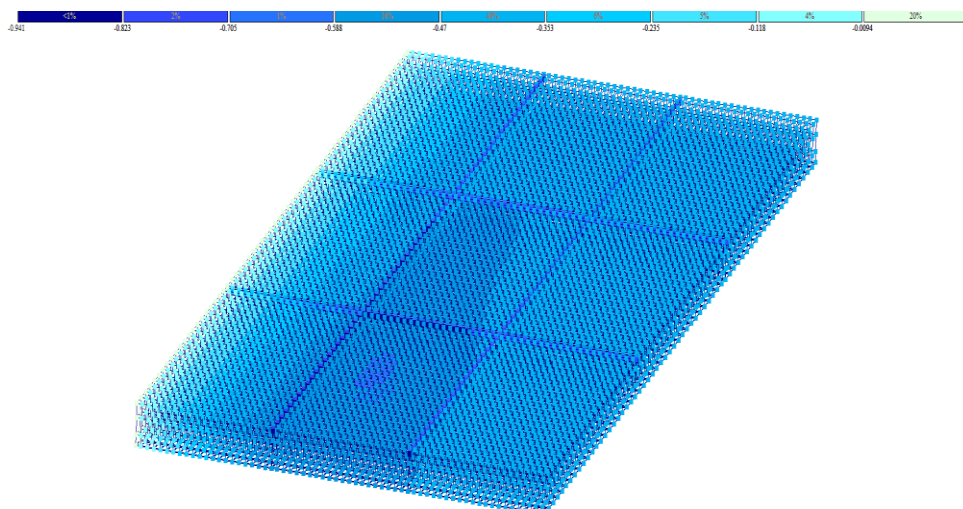


Fig. 5. Contours of vertical displacements of the slab finite element model, mm

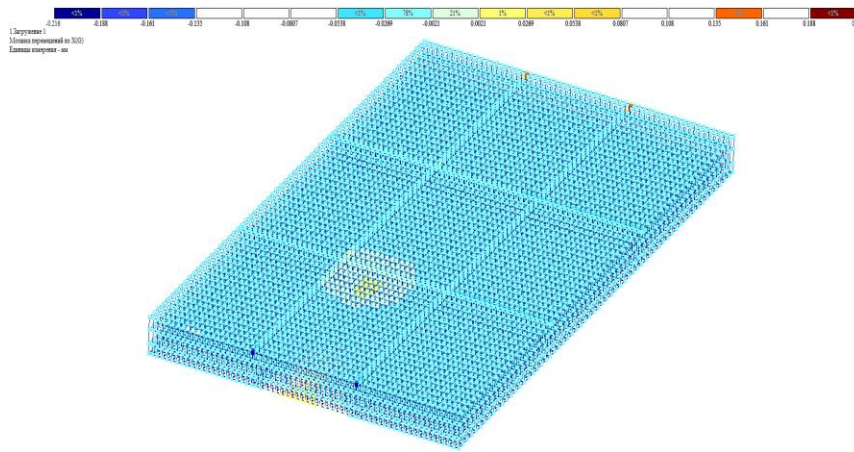


Fig. 6. Contours of horizontal displacements of the slab finite element model, mm

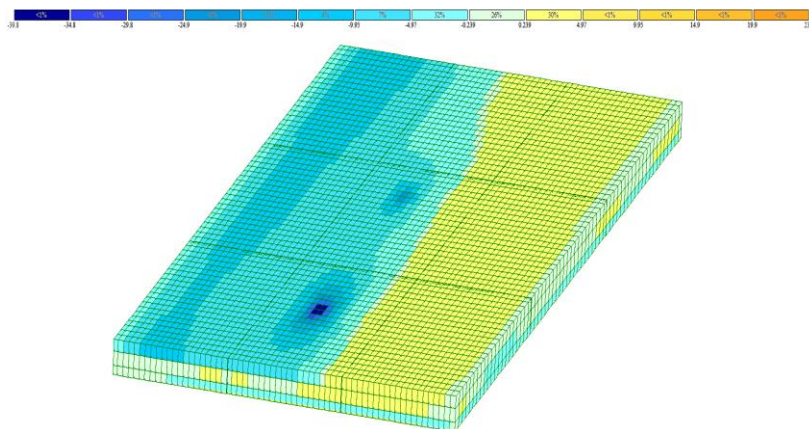


Fig. 7. Contours of vertical stresses of the finite element model

The maximum vertical displacements of the finite element model are 0.941 mm and are localized in the expansion joints and under the center of the wheel imprint. The maximum horizontal displacements are 0.216 mm.

The maximum vertical stresses of the finite element model are 39.8 t/m² and are localized under the center of the aircraft wheel tire imprint.

Comparison of the results obtained in FAARFIELD 2.1.1 and LIRA-SAPR showed consistency of the determined layer thicknesses and the stress distribution pattern. The deviation of calculated bending moments does not exceed 5–8%, confirming the correctness of the adopted calculation schemes. Accuracy was assessed by comparing limiting moments and maximum stresses in characteristic sections.

Conclusions. As a result of the performed theoretical and numerical studies, the stress–strain state of the rigid pavement structure of the airfield access road was determined taking into account real loading parameters of the reference aircraft and material characteristics of the pavement layers.

The stress–strain calculations and verification of strength conditions confirmed sufficient bearing capacity of the three-layer pavement structure for an intensity of 5 aircraft movements per day over 20 years.

Zones of maximum displacements and stresses caused by loading in the wheel imprint area at slab boundaries with expansion joints were identified. Maximum values of displacements and stresses do not exceed permissible limits, confirming the effectiveness of the adopted design solutions. Recommended thicknesses of the upper and lower layers were determined to ensure an optimal balance between strength and material consumption.

Future research should focus on refining pavement performance parameters under varying climatic impacts, accounting for freeze–thaw deterioration and moisture saturation processes, and modeling interaction with weak or heterogeneous subgrades. An additional direction of development is the analysis of the behavior of the coating when changing the intensity and spectrum of loads from modern aircraft, which will increase the reliability of airfield infrastructure facilities.

References

- [1] O.M. Dubyk, O.S. Chernyshova, A.V. Vyshnevskaya, I.M. Osovskyi, and O.M. Danilin, "Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu konstruksii aerodromnoho pokryttia aerodromu derzhavnoi aviatsii", *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, no. 2(6), pp. 52–67, 2025. <https://doi.org/10.32782/apcmj.2025.2.6>.
- [2] O. M. Dubyk, T. V. Dudar, O. S. Chernyshova, and I. M. Osovskyi, "Propozytsii shchodo vidnovlennia aeroportu", *Teoriia ta praktyka dyzainu*, no. 37, pp. 97–110, 2025. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.37.9>.
- [3] S.M. Talakh, O.M. Dubyk, K.M. Lysnytska, V.V. Ilchenko, "Chyselne modeliuvannia napruzhenno-deformovanoho stanu zhorstkykh aerodromnykh pokryttiv pry vzaiemodii zi slabkoiu gruntovoiu osnovoio", *Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, 1(52), pp. 124–132, 2019. <https://doi.org/10.26906/znp.2019.52.1685>.
- [4] O. Dubyk, "Improving the monitoring of the operational and technical condition of rigid airfield pavements", *Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(57), pp. 59–67, 2021. <https://doi.org/10.26906/znp.2021.57.2586>.
- [5] J. Cai, L. N. Y. Wong, and H. W. Yan, "Dynamic response of airport concrete pavement to impact loading", *Advanced Materials Research*, vol. 594–597, pp. 1395–1401, 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.1395>.
- [6] K. Kavin Mathi and K. Nallasivam, "Static analysis of rigid airfield pavement using finite element method vs closed-form solution", *Computational Engineering and Physical Modeling*, vol. 5, no. 4, pp. 23–50, 2022. <https://doi.org/10.22115/cepm.2023.354941.1219>.
- [7] K. Kavin Mathi and K. Nallasivam, "Dynamic and fatigue life prediction analysis of airfield runway rigid pavement using finite element method", *Computational Engineering and Physical Modeling*, vol. 5, no. 3, pp. 1–23, 2022. <https://doi.org/10.22115/CEPM.2022.347999.1215>.
- [8] P. Liu, C. Wang, W. Lu, M. Moharekpour, M. Oeser, and D. Wang, "Development of an FEM-DEM model to investigate preliminary compaction of asphalt pavements", *Buildings*, vol. 12, no. 7, Art. no. 932, 2022. <https://doi.org/10.3390/buildings12070932>.
- [9] A. Rahmawati and F. Rahmawati, "Runway pavement strength evaluation of Yogyakarta International Airports depends on ICAO (ACN/PCN) method with COMFAA 3.0 software", *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 14, pp. 350–359, 2022. <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.04.027>.
- [10] A. Rezaei-Tarahomi, O. Kaya, H. Ceylan, S. Kim, K. Gopalakrishnan, and D. R. Brill, "Development of rapid three-dimensional finite-element based rigid airfield pavement foundation response and moduli prediction models", *Transportation Geotechnics*, vol. 13, pp. 81–91, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.08.011>.
- [11] G. Shafabakhsh, E. Kashi, and M. Tahani, "Analysis of runway pavement response under aircraft moving load by FEM", *Journal of Engineering, Design and Technology*, vol. 16, pp. 233–243, 2018. <https://doi.org/10.1108/JEDT-09-2017-0093>.
- [12] B. Xu, W. Zhang, J. Mei, G. Yue, and L. Yang, "Optimization of structure parameters of airfield jointed concrete pavements under temperature gradient and aircraft loads", *Advances in Materials Science and Engineering*, Art. ID 3251590, 11 pp., 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3251590>.
- [13] J. Yuan, W. Li, Y. Li, L. Ma, and J. Zhang, "Fatigue models for airfield concrete pavement", *Literature review and discussion, Materials*, vol. 14, Art. no. 6579, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14216579>.
- [14] International Civil Aviation Organization, Annex 14: Aerodromes, vol. I, Aerodromes Design and Operations, 9th ed., July 2022. [Online]. Available: <https://news.mcaa.gov.mn/uploads/bookSubject/2022-10/63587f6c9ed35.pdf>
- [15] International Civil Aviation Organization, Doc 9157 Aerodrome Design Manual, Part 3: Pavements, 3rd ed., 2022. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/718551321/Aerodrome-Design-Manual-Part-3-Pavements-Doc-9157-Part-3-Edition>.

**ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЇ
ЖОРСТКОГО ПОКРИТТЯ ПІД'ЇЗНОГО ШЛЯХУ АЕРОДРОМУ**

¹Дубик О.М., к.т.н., доцент,
oleksandr.dubyk@npp.kai.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8082-7603

¹Чернишова О.С., к.т.н., доцент,
oksana.chernyshova@npp.kai.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8132-2153

¹Осовський І.М., аспірант,
5177530@stud.kai.edu.ua, ORCID: 0009-0003-8294-6990

¹Кононенко Д.Ю., студент,
7437049@stud.kai.edu.ua, ORCID: 0009-0008-7425-5379

¹Державний університет «Київський авіаційний інститут»
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна

Анотація. У статті розглянуто питання визначення напружено-деформованого стану конструкції жорсткого покриття під'їзного шляху аеродрому з урахуванням просторових умов розподілу навантаження від розрахункового повітряного судна. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення довговічності та надійності аеродромних покриттів, які зазнають циклічних навантажень і повинні забезпечувати безпечну експлуатацію повітряних суден упродовж нормативного терміну служби.

У роботі наведено характеристику матеріалів тришарової конструкції аеродромного одягу, визначено параметри навантаження від колісної основної опори літака та отримано згинальні моменти у плитах верхнього та нижнього шарів покриття. Розглянуто умови міцності конструкції за критеріями граничних згинальних моментів для різних режимів роботи та інтенсивності експлуатації покриття – 5 літако-виїздів на добу протягом 20 років. Окремо проаналізовано гідрогеологічні умови ділянки, категорії складності ґрунтових умов та їх потенційний вплив на роботу конструкції покриття.

Розрахунок несучої спроможності конструкції виконано в програмному комплексі FAARFIELD 2.1.1, що базується на методі класифікаційних параметрів, та підтверджено скінченно-елементним моделюванням у ПК ЛІРА САПР. Побудована модель включає дев'ять плит аеродромного покриття розміром 3,75×3,75 м з улаштованими деформаційними швами. Отримано значення вертикальних та горизонтальних переміщень і напружень, що дозволяють встановити характер розподілу напружень під дією власної ваги та навантаження від повітряного судна. Максимальні вертикальні переміщення конструкції становлять 0,941 мм, горизонтальні – 0,216 мм, а пікові вертикальні напруження досягають 39,8 т/м².

На основі комплексного аналізу визначено рекомендовані товщини шарів покриття для двох варіантів мас повітряного судна – максимальної злітної маси та маси порожнього літака. Зокрема, рекомендована товщина верхнього шару із бетону С25/30 становить 298 мм та 158 мм відповідно, тоді як товщину нижнього шару з пісного бетону С8/10 оптимізовано до 150 мм. Отримані результати підтверджують достатню несучу спроможність конструкції та забезпечують виконання умов міцності для заданих експлуатаційних параметрів.

У висновку сформульовано рекомендації щодо підвищення ефективності конструктивних рішень аеродромних покриттів і окреслено напрями подальших досліджень.

Ключові слова: аеродромне покриття, під'їзний шлях, напружено-деформований стан, скінченно-елементна модель.

Стаття надійшла до редакції 23.01.2026

Стаття прийнята до друку 21.02.2026

Дата публікації статті 20.03.2026

[This work](#) © 2026 by [Dubyk O.M., Chernyshova O.S., Osovskiy I.M., Kononenko D.Yu.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

**APPROACHES TO CALCULATING REINFORCED CONCRETE SLABS
STRENGTHENED BY ADDING A CROSS-SECTION OF CONCRETE**

¹**Ivaneiko M.M.**, postgraduate student,
mykhailo.m.ivaneiko@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-5390-0446

¹**Khmil R.Ye.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
roman_hl@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7578-8750

¹**Blikharskyi Z.Ya.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
zinovii.y.blikharskyi@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-4823-6405

¹*Lviv Polytechnic National University,*
6 Starosolskyi Street, Lviv, 79013, Ukraine

Abstract. The article presents a study of calculation and design methods for strengthening reinforced concrete floor slabs by installing an additional layer of cast-in-place concrete. The relevance of the topic is determined by the need to extend the service life of existing buildings in Ukraine under increased service loads, changes in the functional use of premises, and stricter reliability and safety requirements. A historical analysis of the development of shear-friction theory is carried out - from initial studies to modern fracture-mechanics models that form the normative basis for the design of interface joints in reinforced concrete members. A comparative analysis of analytical expressions for determining the shear capacity of the "old-new concrete" interface is performed in accordance with national (DBN, DSTU) and foreign codes (Eurocode 2, ACI 318, CSA A23), and approaches to accounting for adhesion, friction and mechanical interlock due to surface roughness and shear keys are summarised. Differences in the treatment of the components of shear resistance, which directly affect the amount of steel required for strengthening, the necessary thickness of the additional concrete layer, and the requirements for preparation of the contact surface, are identified. Particular attention is paid to the methodology of numerical modelling of the stress-strain state of strengthened slabs in specialised software packages such as LIRA-SAPR and others, including issues of selecting finite element types and modelling the interface joint. Recommendations are provided on the rational combination of analytical calculations and numerical modelling results in the design of strengthening solutions, and directions for further research aimed at refining design models and improving the efficiency of structural solutions are outlined. The obtained generalizations can be used to substantiate structural solutions for strengthening floor slabs and to improve the reliability of their calculations at various stages of design.

Keywords: strengthening of reinforced concrete slabs, concrete overlay, interface joint, shear forces.

Introduction. The construction industry in Ukraine and worldwide is currently largely focused on the reconstruction and rehabilitation of existing buildings and structures. A substantial proportion of RC structures commissioned in the second half of the twentieth century are now in a condition approaching the limit state with respect to physical deterioration criteria, or require adaptation to updated regulatory requirements and increased service loads [1-2]. Floor slabs, as the primary horizontal rigidity diaphragms and elements directly carrying imposed loads, are susceptible to defects associated with excessive deflections and crack formation. In addition to physical deterioration, there is often a need to strengthen floor systems when the functional use of spaces changes (e.g., conversion of office areas into storage or archival facilities, installation of heavy equipment on roofs, etc.) or when rectifying design and construction errors [3-4].

Among the wide range of methods for restoring load-bearing capacity-from the installation of additional beams [5-6] to external strengthening with carbon fibre strips [7-8] – the method of cross-sectional enlargement with concrete plays an important role [9-10]. This technique involves the construction of an additional layer of reinforced concrete on top of the existing slab, which makes it

possible to increase the effective depth of the cross-section, enhance its flexural and shear stiffness, and, if required, restore the concrete cover to the reinforcement [11-14].

However, the design of strengthening by cross-sectional enlargement is associated with a number of complex engineering and scientific challenges. The key issue is ensuring reliable composite action between the "old" concrete and the "new" layer. If a reliable interface is not provided, the structure will behave as two independent slabs sliding relative to each other, which will lead to a significant reduction in load-bearing capacity and stiffness compared with a monolithic cross-section [15]. The mechanics of force transfer through the interface joint, which involves adhesion and friction, is complex and depends on many factors, including surface roughness, concrete strength class, the magnitude of normal stresses, shrinkage strains, and others [16].

Analysis of recent research and publications. The issue of ensuring composite action between concretes cast at different times remains a subject of active scientific investigation, while the fundamental concepts of the mechanisms governing force transfer across cracks and interface joints were established in the mid-twentieth century; the development of design methods for interface joints has been inextricably linked to the evolution of reinforced concrete theory, and in the first half of the twentieth century, calculation models were predominantly based on empirical rules that treated concrete as a homogeneous medium and did not account for the nature of crack opening.

A revolutionary milestone was achieved through studies conducted in the 1960s. Birkeland and Birkeland were the first to formulate the hypothesis of the "shear-friction theory" [17]. They proposed treating the failure or interface surface as a rough, serrated structure. According to their model, when one concrete part attempts to slide relative to another, the surface asperities "ride up" over each other, which results in a forced separation of the surfaces (Fig. 1).

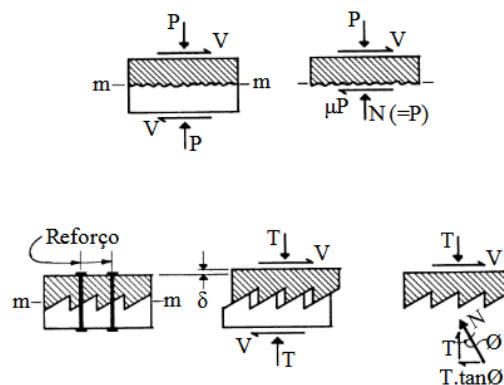


Fig. 1. Shear-friction theory model

If the interface joint is crossed by reinforcement, this separation induces tensile forces in the bars. In response, the reinforcement, acting in the elastic or plastic stage, generates a compressive force at the interface, which in turn mobilises frictional resistance. This mechanical model became the basis for design expressions adopted in most international codes, including ACI 318 (9).

In the late 1960s and the 1970s, Mast and Hofbeck [18] extended this theory by introducing the concepts of bond and the influence of externally applied normal forces. They demonstrated that, even in the absence of transverse reinforcement, the interface can resist substantial shear forces due to chemical adhesion and mechanical interlock of the aggregate, particularly for high-strength concrete.

In the late 1960s and throughout the 1970s, Mast and Hofbeck [18] extended this theory by introducing the concepts of bond and the effect of externally applied normal forces. They demonstrated that, even in the absence of transverse reinforcement, an interface can develop considerable shear resistance due to chemical adhesion and mechanical interlock of the aggregate, particularly in high-strength concrete.

Purpose and objectives. The purpose of this article is to systematise approaches to the design of RC slabs strengthened by cross-sectional enlargement, taking into account the requirements of modern regulatory documents and the capabilities of advanced software packages.

Comparative analysis of codified approaches to the design of the interface joint. The design of strengthening of RC floor slabs is an important stage in engineering practice, as it determines the safety and durability of buildings and structures. This is also important from the standpoint of economic efficiency, since strengthening existing structures is often a more cost-effective solution than complete replacement or reconstruction.

The design of slabs strengthened by cross-sectional enlargement in accordance with previously applicable standards [20] was based on simplified procedures, in which primary attention was paid to the strength of concrete and reinforcement, as well as the stiffness of the structural system. The main emphasis was placed on considering the enlarged cross-section as part of a homogeneous structure, without a detailed allowance for potential slip between the new and old concrete. This implied that, under conditions of adequately ensured bond (roughened surface, mechanical anchors, etc.), the structure behaved as an integral unit. This made it possible to provide the required load-bearing capacity under standard conditions; however, it did not account for all possible time-dependent changes in material properties.

With the transition to the Ukrainian DBN, the requirements for the verification of strength and bond reliability between the old and new concrete have been specified in greater detail [21]. The approach is based on accounting for the composite action of the new and existing cross-sections; however, additional requirements for construction quality control have been introduced, including appropriate methods for connecting old and new structural elements. According to [22], criteria are provided that include the assessment of transverse shear forces, friction coefficients, the adhesive properties of the interface surfaces, and additional reinforcement at the interface. The design of such structures предусматриває verification of shear stresses at the interface surface, which shall satisfy the following conditions:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd},$$

where V_{Ed} is the design value of the shear forces, and V_{Rd} – is the shear resistance at the interface.

To account for the influence of surface roughness parameters and the stress state in the joint zone between the new and the existing concrete parts, coefficients are used that depend on the type of interface surface (smooth, rough, or indented). An important aspect is ensuring adequate reinforcement at the interface, which prevents relative displacement of the layers (Fig. 2). Such a methodology makes it possible to consider not only the physical properties of the materials but also the structural parameters that significantly affect the strength and deformability of strengthened RC slabs.

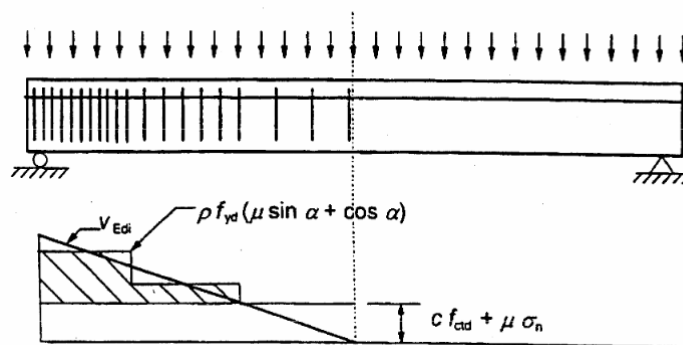


Fig. 2. Shear stress diagram illustrating the required interface reinforcement

Eurocode 2 [23] requires a thorough assessment of the bond between the old and the new concrete, which depends on surface roughness and mechanical anchorage. If the bond is poor or absent, separate design checks are stipulated for each layer, which significantly reduces the overall load-bearing capacity. The European provisions place considerable emphasis on long-term effects such as concrete creep and shrinkage. It is important to properly evaluate how these effects influence strain compatibility between the new and the old concrete in order to avoid undesirable stress redistributions. The use of reinforcement in the new concrete layer is also envisaged, and verification of its placement and compliance with the

design parameters is required to ensure sufficient load-bearing capacity. In addition, composite materials may be applied for supplementary strengthening, which enables an increase in the strength and durability of the structure. A critical step is the correct determination of the shear resistance at the interface between the new and the old concrete.

Study [24] analyses how different international standards propose different approaches to assessing the strength of the joint between old and new concrete when strengthening RC slabs by cross-sectional enlargement. In particular, in Model Code 1990 the interface shear strength is calculated by considering cohesion and friction, which are determined using tabulated coefficients. The upper limit of shear strength is set at 25% of the concrete compressive strength, which serves to limit the forces that can be transferred across the joint. In Eurocode 2, the approach is similar; however, it additionally accounts for the influence of the inclination angle of the reinforcement crossing the joint and the normal stresses arising in the contact zone between the old and the new concrete. In this case, the maximum strength is limited to 50% of the concrete compressive strength. The Canadian standard CSA A23.3 introduces a coefficient λ that accounts for the possibility of cracking along the shear plane, which may occur due to relative movement between the old and the new concrete. The maximum joint strength in this case is also limited to 25% of the concrete compressive strength. ACI 318-11, unlike the European and Canadian approaches, focuses exclusively on the reinforcement crossing the layers, without detailed consideration of cohesion and friction. The shear strength in this standard is limited to the minimum value of $0.2f_c$ or 5.52 MPa, depending on the condition of the old-concrete surface. Table 1 illustrates how different standards address the calculation of joint strength between the old and the new concrete during structural strengthening.

Table 1 – Strength of the interface joint between old and new concrete according to different standards

Design code	Year	Equation
Model Code 1990 [25]	1993	$\tau_R = c. f_{ctd} + \mu. (\sigma_n + \rho. f_y) \leq 0.25. f_{ctd}$
Eurocode 2 [24]	2004	$\tau_R = c. f_{ctd} + \mu. \sigma_n + \rho. f_y. (\mu. \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0.5. v. f_{cd}$
CSA A23.3-04 [26]	2004	$\tau_R = \lambda. \phi_c. (c + \mu. (\sigma_n + \rho. f_y. \sin \alpha)) + \phi_2. \rho. f_y. \cos \alpha \leq 0.25. \phi_c. f_c$
ACI 318-11 [27]	2011	$\tau_R = \rho. f_y. (\mu. \sin \alpha + \cos \alpha)$
Model Code 2010 [28]	2013	$\tau_R = c. f_c / 3 + \mu. (\sigma_n + \rho. k. f_y) + \alpha. \rho. \sqrt{f_c}. f_y \leq \beta_c. v. f_{cd}$

Features of modelling in the LIRA-SAPR software package. Modelling of the stress-strain state of RC slabs is performed on the basis of the finite element method in the environment of the LIRA-SAPR software package or other software tools [29-30]. This enables the application of both simplified linear-elastic slab models and spatial materially nonlinear models that account for the actual structural behaviour, including concrete damage, cracking, and the real performance of the "old/new concrete" interface.

In [31], a spatial model based on solid finite elements of type SE-36 was used to analyse deflections of RC slabs strengthened by concrete overlay and supported along the contour (Fig. 3 and Fig. 4). The slab was discretised into a fine regular mesh in plan and into 12 layers through the thickness, which made it possible to assign different elastic moduli to individual layers and to vary slab stiffness. This approach is demonstrative for modelling strengthened slabs: the existing slab and the new concrete layer should be represented as separate layers within the solid model with individual material properties, while the reduction in stiffness in cracked zones should be introduced through adjustment of the elastic moduli.

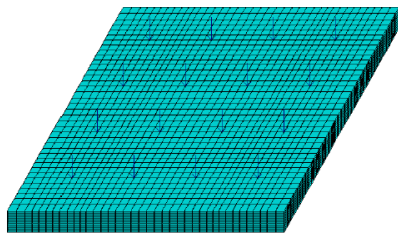


Fig. 3. Computational model of the slab in the LIRA-SAPR software package

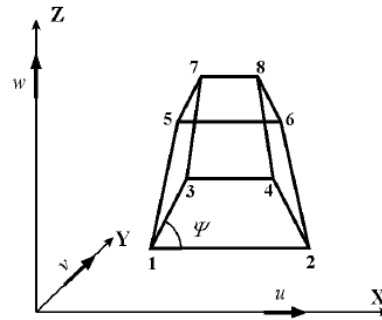


Fig. 4. Schematic representation of the SE-36 finite element

In [32], the slab was modelled using three-dimensional solid brick finite elements (analogous to FE-36 in LIRA-SAPR), which made it possible to capture the stress distribution through the entire thickness and the development of cracks. The concrete layers were defined as separate element sets with their own physical and mechanical properties (Fig. 5, Fig. 6). The "old-new concrete" interface was not modelled as perfectly rigid but rather through a system of contact nodes and nonlinear contact elements governed by a stress-slip (τ - s) relationship, which enabled partial opening and slip between the layers. The reinforcement was represented by embedded bar elements acting compositely with the solid concrete elements. This formulation made it possible to accurately reproduce the redistribution of shear stresses at the interface and a realistic deformation pattern, which is critical for analysing the behaviour of strengthened slabs.

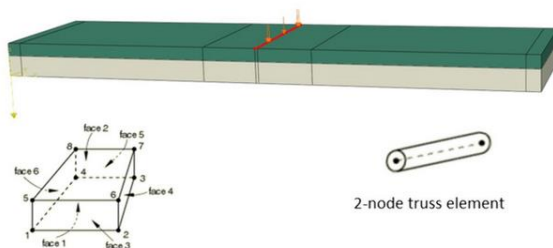


Fig. 5. Schematic of the test slab

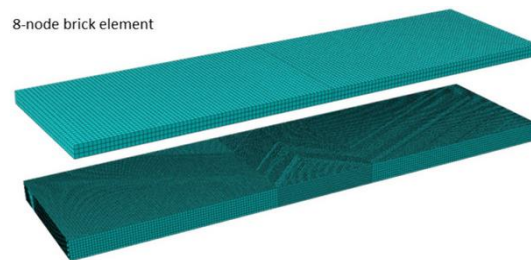


Fig. 6. Meshing of the slab and the strengthening layer

In [33], a comparison is presented of three approaches to the analysis of shell FE floor slabs available in LIRA-SAPR: linear analysis, materially nonlinear analysis, and analysis in the "engineering nonlinearity" mode. The linear model is used for the initial evaluation of displacements and for reinforcement design in accordance with code provisions. The materially nonlinear option is built on the same finite element scheme, but with allowance for the nonlinear constitutive behaviour of concrete and reinforcement (exponential or piecewise-linear σ - ϵ diagrams) and is implemented using a stepwise/stepwise-iterative procedure in the nonlinear processor. This makes it possible to analyse stiffness degradation of the slab with increasing load, as well as crack opening width and crack depth, which is fundamentally important when assessing the effectiveness of slab strengthening by cross-sectional enlargement.

In [34], several two-dimensional finite element models of reinforcement-concrete bond were developed in the LIRA-SAPR software package, based on introducing special bond bar elements FE-210 between plate elements representing concrete and reinforcement (Fig. 7, Fig. 8). The bond elements act in tension, compression, or shear, have their own nonlinear deformation law, and allow reproduction of τ - s relationships for the interface layer, as well as the distributions of shear stresses, displacements, and strains along the anchorage length. By analogy with these models, the "existing slab – new concrete layer" interface can be described by a system of discrete elements that simulate the action of shear keys, anchors, surface roughness, or an adhesive interface, which constitutes a promising direction for refined analyses of slabs strengthened by cross-sectional enlargement.

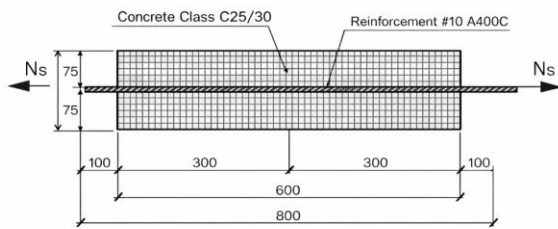


Fig. 7. Two-dimensional model of reinforcement-concrete bond

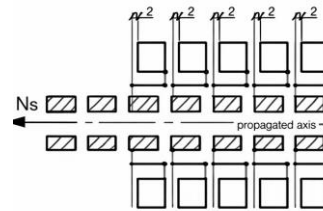


Fig. 8. FE discretisation of the model

Thus, several levels of modelling detail for floor slabs have been established in the LIRA-SAPR software package:

- simplified linear shell models with equivalent thickness and stiffness, used for preliminary selection of strengthening parameters;
- spatial models based on solid finite elements with layerwise-defined concrete properties for the existing slab and the new layer, in which nonlinearity is accounted for either by reducing the elastic moduli or by means of materially nonlinear analysis;
- models incorporating discrete bond elements, which make it possible to analyse the distribution of forces at the interface and the potential slip between layers.

Conclusions. The design of floor slabs strengthened by concrete overlay is based on the shear-friction theory. The DBN provisions and international codes allow the consideration of cohesion and other parameters. Numerical modelling in the LIRA-SAPR software package or other analysis tools using solid elements is important for the correct assessment of the stress-strain state. However, most existing recommendations propose limit-state-based design, treating the interface either as perfectly rigid or as fully separated. In contrast, the actual behaviour of a strengthened slab is often governed by an intermediate stage of partial slip, which affects both the strength and deformability of slabs. Ukrainian and European regulatory documents also differ in the empirical coefficients used for interface shear design, which complicates the adaptation of international experience. The procedures for accounting for shrinkage and creep between old and new concrete in domestic and foreign software packages are often reduced to simplified calculation approaches that do not represent the actual stress-strain state at the interface, which may lead to erroneous predictions of the overall load-bearing capacity of the strengthening system.

References

- [1] Z.Ya. Blihar'skyi, *Rekonstruktsiia ta pidsylennia budivel ta sporud*: navch. posib. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 2008.
- [2] A.Yu. Kontorchyk, B.V. Zakorko, "Rekonstruktsiia vysotnykh budivel ta sporud", *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, no. 4, pp. 55–61, 2015.
- [3] O.V. Yakymenko, K.O. Kiktova, *Tekhnichna ekspluatatsiia budivel ta sporud*: navch. posib., 2019.
- [4] V.V. Saviov'skyi, *Rekonstruktsiia budivel i sporud*. Kyiv: Lira-K, 2018.
- [5] O.P. Skoruk, "Pidsylennia konstruktsii porozhnistykh plyt perekryttia metalevymy balkamy ta armovanym fibrobetonom", *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka*, no. 12, pp. 115–125, 2023.
- [6] O. Vytak, T. Bobalo, "Strengthening reinforced concrete slabs by introducing additional reinforced concrete beams", *Theory and Building Practice*, vol. 6, no. 1, pp. 34–44, 2025.
- [7] D. Banu, N. Taranu, "Traditional solutions for strengthening reinforced concrete slabs", *Bulletin of the Politehnic Institute of Iasi. Secția Construcții și Arhitectura*, vol. 56, pp. 53–60, 2010.
- [8] R. Koppitz, A. Kenel, T. Keller, "Punching shear strengthening of flat slabs using prestressed carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) straps", *Engineering Structures*, vol. 76, pp. 283–294, 2014. doi: 10.1016/j.engstruct.2014.07.017.

- [9] S.S. Sahranavard, H. Jahangir, H. Haji Kazemi, "An experimental and numerical investigation of RC slabs externally strengthened by perforated steel plates", *Structures*, vol. 45, pp. 1239–1252, 2022. doi: 10.1016/j.istruc.2022.09.052.
- [10] H. Fernandes, V. Lúcio, A. Ramos, "Strengthening of RC slabs with reinforced concrete overlay on the tensile face", *Engineering Structures*, vol. 132, pp. 540–550, 2017.
- [11] N. Randl, "Design of concrete overlays for strengthening and repair", *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*: proc. of the Int. Conf. Cape Town, 2013.
- [12] J. Silfwerbrand, "Shear bond strength in repaired concrete structures", *Materials and Structures*, vol. 36, pp. 419–424, 2003.
- [13] H. Beushausen, M. Alexander, "Bond strength of concrete overlays: The influence of substrate moisture preparation", *Cement and Concrete Research*, vol. 92, pp. 84–91, 2017.
- [14] A.U. Qazi, et al., "Strengthening and retrofitting of low strength reinforced concrete slabs with high strength overlay: experimental and numerical investigation", *International Journal of Structural Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 416–436, 2024.
- [15] A.O. Abdelatif, M. Mustafa, M.A. Kabosh, "Modelling of structural behaviour in strengthened reinforced concrete one-way slabs using concrete overlay", *University of Khartoum Engineering Journal*, vol. 11, no. 2, 2021.
- [16] M. Gołdyn, "Shear capacity of the interface between concretes cast at different time in the light of experimental investigations and codes of practice", *Archives of Civil Engineering*, pp. 275–298, 2022.
- [17] P.W. Birkeland, H.W. Birkeland, "Connections in precast concrete construction", *ACI Journal Proceedings*, vol. 63, no. 3, pp. 345–368, 1966.
- [18] J.A. Hofbeck, I.O. Ibrahim, A.H. Mattock, "Shear transfer in reinforced concrete", *ACI Journal Proceedings*, vol. 66, no. 2, pp. 119–128, 1969.
- [19] J. Walraven, J. Frenay, A. Pruijssers, "Influence of concrete strength and load history on the shear friction capacity of concrete members", *PCI Journal*, vol. 32, no. 1, pp. 66–84, 1987.
- [20] SNiP 2.03.01-84*. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Gosstroj SSSR, 1984.
- [21] DBN V.2.6-98:2009. Betonni ta zalizobetonni konstruksii. Osnovni polozhennia. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2011.
- [22] DSTU B V.2.6-156:2010. Betonni ta zalizobetonni konstruksii z vazhkohto betonu. Pravyla proektuvannia. Kyiv: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku ta budivnytstva Ukrainy, 2010.
- [23] DSTU-N B EN 1992-1-1:2010. Yevrokod 2. Proektuvannia zalizobetonnykh konstruksii. Chastyna 1-1. Zahalni pravyla i pravyla dlia sporud (EN 1992-1-1:2004, IDT). Kyiv: DP "Ukrarkhbudinform", 2012.
- [24] H.D.P. Fernandes, Strengthening of flat slabs with reinforced concrete overlay – analysis and development of the solution: doctoral dissertation. Lisboa: Universidade NOVA de Lisboa, 2019.
- [25] Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP model code 1990: design code. London: Thomas Telford Publishing, 1993.
- [26] CAN/CSA A23.3. Design of concrete structures. Rexdale: Canadian Standards Association, 2004.
- [27] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-08) and commentary. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2011.
- [28] Fib – Fédération Internationale du Béton, fib Model Code for Concrete Structures 2010. Berlin: Ernst & Sohn, 2013.
- [29] Posibnyk korystuvacha PK LIRA-SAPR. Systema "Montazh". Kyiv: TOV "LIRA SAPR", [b. r.].
- [30] O.S. Horodetskyi, M.S. Barabash, R.Yu. Vodopianov, *Kompiuterni tekhnolohii proektuvannia zalizobetonnykh konstruksii*. Kyiv: Hamma-S, 2013.
- [31] D.V. Smorkalov, *Doslidzhennia prohyniv plyt, opertykh po konturu*, 2017.
- [32] M. Sharafaldeen, A.O. Abdelatif, "3D non-linear finite element modeling of one-way RC slab strengthened with concrete overlay", *Journal of Engineering and Applied Science*, vol.

71, no. 1, art. 83, 2024.

- [33] M.V. Vintsiuk, V.P. Samchuk, D.Ya. Kysliuk, "Rozrakhunok bahatoprolitnoi monolitnoi zalizobetonnoi plyty perekryttia u fizychno neliniinii postanovtsi za dopomohoiu PK LIRA-SAPR", *Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*, iss. 10, pp. 35–43, 2018.
- [34] V.I. Kolchunov, I.A. Yakovenko, E.A. Dmitrenko, "Konechno-elementnoe modelirovanie nelineinoy ploskoy zadachi stsepleniia betona i armatury v PK "Lira-SAPR", *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy*, no. 3, pp. 6–15, 2016.

ПІДХОДИ ДО РОЗРАХУНКУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ, ПІДСИЛЕНИХ НАРОЩЕННЯМ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ БЕТОНОМ

¹Іванейко М.М., аспірант,
mykhailo.m.ivaneiko@lpnu.ua, ORCID: 0000-0002-5390-0446

¹Хміль Р.Є., д.т.н., професор,
roman.y.khnil@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-7578-8750

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

¹Національний університет «Львівська політехніка»
вул. Старосільських 6, м. Львів, 79013, Україна

Анотація. У статті представлено дослідження методів розрахунку та проектування підсилення залізобетонних плит перекриття шляхом улаштування додаткового шару монолітного бетону. Актуальність теми визначається необхідністю продовження ресурсу роботи наявних будівель України за умов підвищених експлуатаційних навантажень, змін корисного призначення приміщень і посиленних вимог до надійності та безпеки. Проведено історичний аналіз розвитку теорії зсувного тертя – від початкових робіт до сучасних моделей механіки руйнування, що формують нормативну базу для розрахунку контактних швів залізобетонних елементів. Виконано порівняльний аналіз аналітичних залежностей для визначення міцності контактної шва «старий–новий бетон» відповідно до національних (ДБН, ДСТУ) та іноземних норм (Eurocode 2, ACI 318, CSA A23), узагальнено підходи до врахування адгезії, сил тертя та зчеплення за рахунок шорсткості поверхні і шпонок. Виявлено відмінності у врахуванні складових зусиль зсуву, які безпосередньо впливають на металоємність підсилення, необхідну товщину додаткового шару та вимоги до підготовки контактної поверхні. Окрему увагу приділено методології числового моделювання напружено-деформованого стану підсиленних плит у спеціалізованих програмних комплексах таких як ПК Ліра Сапр та інші, зокрема питанням вибору, типів скінченних елементів та моделювання контактної шва. Наведено рекомендації щодо раціонального поєднання аналітичних розрахунків та результатів числового моделювання при проектуванні підсилення, а також окреслено напрями подальших досліджень, спрямованих на уточнення розрахункових моделей і підвищення ефективності конструктивних рішень. Отримані узагальнення можуть бути використані для обґрунтування конструктивних рішень підсилення плит перекриття та підвищення достовірності їх розрахунку на різних етапах проектування.

Ключові слова: підсилення залізобетонних плит, бетонне нарощення, контактний шов, зусилля зсуву.

Стаття надійшла до редакції 20.12.2025

Стаття прийнята до друку 9.02.2026

Дата публікації статті 20.03.2026

[This work](#) © 2026 by [Ivaneiko M.M.](#), [Khnil R.Ye.](#), [Blikharskyi Z.Ya.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

ВПЛИВ ДИСПЕРСНОГО АРМУВАННЯ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНУ: ОГЛЯД

¹Андрійчук О.В., к.т.н., доцент,

o.andriichuk@lntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6275-097X

¹Громов Д.Ю., аспірант,

hromov.d2711@lntu.edu.ua, ORCID: 0009-0006-7862-6662

¹Луцький національний технічний університет

вул. Львівська, 75, м. Луцьк, 43018, Україна

Анотація. Сучасні умови експлуатації бетонних конструкцій зумовлюють підвищені вимоги до фізико-механічних характеристик матеріалів, зокрема міцності, тріщиностійкості, ударної в'язкості та зносостійкості, а також до їх стійкості в умовах впливу агресивних середовищ. Перспективним способом удосконалення експлуатаційної надійності бетонних конструкцій є застосування дисперсного армування – рівномірне додавання коротких волокон у бетонну матрицю. Таке технологічне рішення зменшує інтенсивність розвитку тріщин і їх ширину, підвищує енергоємність руйнування, покращує розподіл напруження в матеріалі та забезпечує надійну роботу конструкцій в умовах динамічного або ударного навантаження.

У статті подано огляд результатів вітчизняних та зарубіжних досліджень щодо впливу різних типів фібри: сталевий, полімерної, базальтової, скляної та вуглецевої на основні показники міцності бетону (стиск, осьовий розтяг, розтяг при згині, стійкість до ударних навантажень), а також на пов'язані експлуатаційні характеристики (водонепроникність, морозостійкість, хімічна стійкість). Показано, що ефективність такого типу армування значною мірою визначається геометрією та механічними властивостями волокон, видом навантаження, умовами експлуатації, орієнтацією волокон і якістю їх зчеплення з бетонною матрицею. Здійснено узагальнення експериментальних результатів щодо використання фібри в дорожніх конструкціях (водовідвідні лотки, безнапірні труби, оболонки), залізничних шпалах, а також у конструкціях з підвищеною вибухостійкістю.

Окрему увагу приділено комбінованому застосуванню фібри та класичного армування для підвищення несучої здатності та оптимізації розмірів конструктивних елементів. Розглянуто перспективи поєднання дисперсного армування з наномодифікованою цементною матрицею, яка має покращену мікроструктуру та підвищені тріщиностійкість і швидкість твердіння.

Ключові слова: фібробетон, дисперсне армування, фізико-механічні властивості, тріщиностійкість, довговічність, динамічні навантаження.

Вступ. Бетон є одним із найпоширеніших конструкційних матеріалів у будівництві завдяки високій міцності на стиск, широкій доступності сировини та технологічній простоті виготовлення. Але традиційні цементні композити характеризуються низькою тріщиностійкістю, недостатньою ударною в'язкістю та схильністю до формування мікротріщин під дією усадкових і температурних деформацій. Ці недоліки суттєво обмежують довговічність і експлуатаційну надійність бетонних конструкцій, особливо в умовах впливу агресивних середовищ або дії змінних і динамічних навантажень.

У публікації зосереджено увагу передусім на фізико-механічних властивостях бетону (міцність на стиск, осьовий розтяг, розтяг при згині, тріщиностійкість, ударна в'язкість), а також на експлуатаційних характеристиках (довговічність, морозостійкість, водонепроникність). У межах цього огляду мікроструктурні аспекти наведено вибірково – лише для інтерпретації змін фізико-механічних та експлуатаційних характеристик, описаних у проаналізованих джерелах.

Перспективним методом покращення фізико-механічних властивостей бетону є його

дисперсне армування, що передбачає рівномірне додавання коротких волокон у структуру бетонної матриці. Така технологія забезпечує перерозподіл локалізованих напружень, зменшення тріщиноутворення і підвищення енергоємності руйнування, що в комплексі підвищує надійність та довговічність конструкцій. Залежно від типу волокон (сталеві, полімерні, базальтові, скляні або вуглецеві) – формується різний вплив на мікроструктуру та механічні характеристики бетону, що забезпечує широкі можливості для адаптації складу фібробетонної суміші під конкретні умови експлуатації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Упродовж останніх десятиліть фібробетон і його дисперсне армування активно досліджуються в контексті підвищення тріщиностійкості, міцності та довговічності бетонних конструкцій. Значна кількість наукових робіт присвячена вивченню впливу геометричних параметрів волокон, їх структури та об'ємного вмісту на фізико-механічні властивості бетону.

Зокрема, дослідження [1–4] підтверджують високу ефективність сталевих волокон, особливо гачкоподібної форми (анкерна фібра) для підвищення міцності на розтяг при згині, тріщиностійкості та стійкості до ударних і вибухових навантажень. Наукові праці [2, 5, 6] описують позитивний вплив базальтової фібри на морозостійкість, формувальні властивості та мікроструктуру суміші. Полімерні волокна (фібри), зокрема поліпропіленові, активно застосовуються як недорогий засіб підвищення терміну експлуатації, зменшення усадкових деформацій і підвищення ударної в'язкості [7, 8].

Опубліковані результати наукового дослідження [9] описують суттєве вдосконалення структури бетону внаслідок застосування наномодифікованої цементної матриці з дисперсним армуванням, що дозволяє отримати високу абсолютну міцність при дії динамічних навантажень.

Варто зазначити, що науковці досліджують і комбіновані підходи армування конструкцій – зокрема поєднання фібрового армування з традиційними арматурними каркасами, що дозволяє покращити експлуатаційні показники конструкцій у складних умовах їх навантаження [4, 10]. У дослідженні [11] запропоновано вдосконалену методику розрахунку комбіновано-армованих елементів із урахуванням повної роботи матеріалу на стиск та осьовий розтяг, що є особливо актуальним для проектування згинальних конструкцій зі сталеві фібробетону.

Водночас аналіз літературних джерел свідчить про відсутність уніфікованих підходів до оцінки ефективності різних типів волокон та їх комбінацій, особливо в умовах комплексного навантаження (вибухового, вогневого, повторного) або впливу агресивних середовищ. Це зумовлює необхідність подальшої систематизації наявних даних і проведення комплексних порівняльних досліджень застосування різних типів фібр для армування бетону.

Мета та завдання. Метою цього дослідження є узагальнення результатів наукових експериментів щодо впливу різних типів дисперсного армування на фізико-механічні властивості бетону та аналіз ефективності застосування фібрових композитів у будівництві.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання:

- 1) проаналізувати основні типи волокон, що використовуються для дисперсного армування бетону;
- 2) встановити вплив геометричних і механічних характеристик волокон на тріщиностійкість, міцність та інші основні характеристики бетону;
- 3) охарактеризувати механізми взаємодії волокон із бетонною матрицею;
- 4) систематизувати переваги застосування фібробетону – залежно від умов експлуатації.

Матеріали та методика дослідження. Оскільки наукова робота має оглядовий характер і базується на критичному аналізі сучасної наукової літератури, що присвячена впливу дисперсного армування на фізико-механічні властивості та мікроструктуру бетону. Для опрацювання проаналізовано 32 наукових джерела (рецензовані наукові статті, оглядові праці, експериментальні звіти та чинні нормативні документи), з яких більшість опубліковані протягом останнього десятиліття.

Основним методом є порівняльний аналіз результатів, представлених у різних дослідницьких роботах. Особливу увагу приділено впливу типу волокон (сталевих, полімерних, базальтових, скляних, вуглецевих) на основні експлуатаційні характеристики бетону: міцність на

стиск, осьовий розтяг і розтяг при згині, тріщиностійкість, зносостійкість, морозостійкість, водопоглинання та стійкість до впливу агресивних середовищ. Окремо проаналізовано результати мікроструктурного аналізу, а також дані числового моделювання поведінки фібробетону.

Результати досліджень. Варто зазначити, що у будівництві бетон залишається одним із ключових конструкційних матеріалів, який широко застосовується у житловому, промисловому та інфраструктурному секторі завдяки високій міцності на стиск, доступності сировинної бази та відносній простоті технології виготовлення. Водночас він має і суттєві недоліки – низька тріщиностійкість, обмежені характеристики на осьовий розтяг і розтяг при згині, а також утворення мікротріщин під дією усадкових і температурних деформацій. Ці недоліки актуалізуються при дії повторних чи ударних навантажень, а також за експлуатації в умовах впливу агресивних середовищ.

Фібробетон – це різновид бетонного композиту, що складається з в'язучого, заповнювачів та дисперсних волокон різного типу і геометрії. Якщо модуль пружності волокон перевищує модуль бетонної матриці, волокна сприймають на себе основну частину зовнішніх навантажень, а міцність композиту зростає зі збільшенням їх вмісту до певного оптимального рівня. Армування сприяє покращенню міцності бетону на осьовий розтяг, стиск і розтяг при згині, а також ударної в'язкості, тріщиностійкості, зносо- й морозостійкості, водонепроникності та терміну експлуатації [1]. Важливо зазначити, що вплив на міцність на стиск є залежним від типу волокон і технології виготовлення.

Армувальні волокна з низьким модулем пружності (нейлон, поліпропілен, акрил) менш ефективно підвищують жорсткість, але суттєво підвищують пружні властивості. Волокна з високим модулем пружності (сталеві, скляні або вуглецеві) забезпечують підвищення міцності та жорсткості конструкцій. Водночас ефективність передачі напружень від матриці до волокон залежить від взаємодії між цими компонентами [12].

Аналіз літературних джерел засвідчує, що різні типи волокон здійснюють специфічний вплив на фізико-механічні та експлуатаційні властивості бетону. У більшості досліджень сталеві волокна асоціюються з підвищенням жорсткості та опору розтягу при згині, полімерні (зокрема поліпропіленові) – зі зменшенням утворення усадкових тріщин, базальтові – з покращенням морозостійкості і адгезії, тоді як скловолокно – зі зниженням проникності та підвищенням стійкості до впливу агресивних середовищ. Крім того, у низці робіт відзначається зменшення пористості, ущільнення мікроструктури цементного каменю та підвищення його однорідності.

Отже, дисперсне армування – це ефективний метод підвищення експлуатаційних характеристик бетону, який дозволяє адаптувати матеріал до конкретних умов роботи шляхом раціонального підбору типу і кількості армувальних волокон за об'ємом (μ).

Окремим напрямом застосування дисперсно-армованих бетонів є використання вібропресованих сумішей, які використовуються для виготовлення елементів дорожньої та інженерної інфраструктури. На водоцементне відношення (В/Ц) вібропресованого фібробетону впливають витрата цементу, кількість і довжина сталевої фібри, а також вміст повітровтягувальної добавки. Слід зазначити, що додавання фібри ускладнює процес формування суміші, знижує її ущільнюваність, а це зумовлює потребу у збільшенні В/Ц. Водночас введення повітровтягувальних пластифікаторів знижує В/Ц відношення і покращує реологічні властивості суміші. Підвищення вмісту цементу та повітровтягувальної добавки компенсує вплив фібрового армування, забезпечуючи збереження формувальних властивостей. Додавання сталевої фібри у вібропресовану бетонну суміш сприяє підвищенню міцності на стиск у середньому на 10–17 % (до 80–100 МПа), а також міцності на розтяг при згині на 25–46 % (до 9–12 МПа) [2]. Таким чином, отримання оптимальних фізико-механічних характеристик вібропресованого фібробетону можливе за умови раціонального підбору складу, що передбачає врахування геометричних параметрів сталевої фібри, які визначають ущільнюваність бетонної суміші. Оптимальні показники досягаються при використанні коротких волокон, підвищеному вмісті цементного тіста та застосуванні пластифікуючих і повітровтягувальних добавок, що дозволяє забезпечити достатню ущільнюваність суміші без надмірного збільшення водоцементного відношення та сформувати однорідну і міцну структуру композиту.

Отримані науковцями Національного університету водного господарства та природокористування (НУВГП) результати дозволяють рекомендувати вібропресований сталевібробетон із наджорстких сумішей для виготовлення дорожніх елементів, які мають високу міцність та ударостійкість [2]. Відповідно до ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016 «Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону» [13], при розрахунку сталевібробетонних елементів слід здійснювати встановлення опору на стиск аналогічно, як і для бетонної матриці, з якої виготовлено фібробетон. Для дрібнозернистого бетону це може призвести до зниження несучої здатності, оскільки фактична міцність сталевібробетону перевищує міцність його бетонної матриці [11, 14].

Згідно з результатами експериментальних досліджень [3], збільшення об'ємної частки сталевібробетону підвищує міцність фібробетону на осьовий розтяг, його початковий модуль пружності, зменшує відносні деформації. Науковцями Львівського національного аграрного університету (ЛНАУ) досліджувалося фіброве армування на рівні $\mu = 0,7\%$, $\mu = 1,25\%$ і $\mu = 1,8\%$, що охоплюють доцільний діапазон для практичного застосування. При вмісті фібри менше $\mu = 0,7\%$ ефект армування виявляється мало вираженим, тоді як перевищення $\mu = 1,8\%$ ускладнює формування фібробетонної суміші, погіршує її оброблюваність і зменшує економічну доцільність – через зростання вартості матеріалів. Узагальнення результатів досліджень свідчить, що оптимальний діапазон об'ємного вмісту сталевібробетону формується як компроміс між підвищенням механічних характеристик фібробетону та забезпеченням належних технологічних і економічних показників його виготовлення.

Відповідно до результатів проведеного дослідження [1] встановлено, що ефективність фібрового армування залежить від площі прикладання зосередженого навантаження до конструкцій. За умов малої контактної площі вплив сталевих волокон є мало вираженим, а при збільшенні площі навантаження – армувальний ефект проявляється чіткіше та стабільніше. За малої площі контакту формується локалізований напружений стан, унаслідок чого значна частина волокон не залучається до роботи з перерозподілу напружень. Із зростанням площі прикладання навантаження ефективність залучення волокон у процес стримування тріщиноутворення підвищується.

Таким чином, сталеве дисперсне армування – це спосіб підвищення локальної міцності бетону, особливо за оптимального об'ємного вмісту волокон. Необхідно враховувати, що хаотична орієнтація волокон у цементній матриці може знижувати ефективність армування – рис. 1.



Рис. 1. Сталеві волокна з гачкоподібними кінцями (анкерна фібра) [1]

Загальновідомо, що сталеві волокна ефективніше підвищують міцність бетону на розтяг при згині порівняно з міцністю на стиск, осьовий розтяг або сколювання. Сталевібробетон (СФБ) також має підвищену стійкість до дії вибухових навантажень.

Науковцями Луцького національного технічного університету (ЛНТУ) було проведено серію досліджень різноманітних тонкостінних конструкцій для дорожнього будівництва (безнапірні труби, лотки для притрасового водовідведення, оболонкові елементи у формі гіперболічного параболоїда) [15, 16], які виготовлялися зі сталевібробетону – рис. 2.



Рис. 2. Дослідження СФБ-конструкцій в ЛНТУ:
а – безнапірні труби; б – лотки для водовідведення; в – оболонки-гіпари

Під час дослідження СФБ-конструкцій, що представлені на рис. 2, встановлено вплив відсотка армування на міцність бетону та сталевіфробетону на центральний стиск та осьовий розтяг. Отримані в результаті експерименту дані представлено в табл. 1.

Табл. 1 – Встановлені механічні характеристики бетонної та СФБ-матриці [17]

№ зразків	Міцність на стиск, МПа			Міцність на осьовий розтяг, МПа		
	Бетон	СФБ, $\mu = 2,5$	СФБ, $\mu = 1,5$	Бетон	СФБ, $\mu = 2,5$	СФБ, $\mu = 1,5$
1	32,5	36,0	30,9	2,01	2,80	2,76
2	29,5	34,3	32,5	1,86	2,94	2,38
3	32,5	37,8	33,7	2,20	2,75	2,45
Середнє	31,5	36,0	32,4	2,02	2,83	2,53

Додавання сталевих волокон покращує механічні характеристики фібробетону, зокрема суттєво підвищує його міцність на розтяг при згині – згідно з отриманими результатами дослідження [4]. Схематичне зображення впливу сталевих волокон на властивості бетону наведено на рис. 3.



Рис. 3. Основні чинники, що визначають ефективність додавання сталеві фібри до складу бетонної суміші [4]

Станом на сьогодні – актуальним і перспективним напрямком підвищення ефективності сталевіфробетонних конструкцій є здійснення контролю за орієнтацією сталевих волокон, що забезпечує стримування розвитку тріщин і зменшує ширину їх розкриття.

Згідно з результатами комплексного дослідження китайських науковців [18] – орієнтацію фібрових волокон в бетонній суміші можливо змінювати за допомогою електромагнітного поля, досягаючи кута повороту до 90° . Проведені ними експерименти з розколювального випробування зразків підтвердили ефективність такого підходу. Найвищу міцність було зафіксовано у зразках із орієнтацією волокон у секторі 0° – 15° , що найбільше відповідає напрямку прикладеного навантаження.

У дослідженні [19] також проаналізовано вплив орієнтації сталевих фібри, що забезпечувалася дією магнітного поля, на міцнісні характеристики сталевібробетону. Показано, що ефективність орієнтування волокон істотно залежить від рухомості бетонної суміші. За низької рухомості осад конуса (ОК) рівний 7 см вплив магнітного поля на міцність бетону на розтяг при згині є незначним. Водночас підвищення рухомості суміші до ОК = 21 см забезпечує суттєве покращення ефекту орієнтації фібри, що приводить до зростання міцності на розтяг при згині у 1,6 рази у віці 7 днів та у 1,5 рази у віці 28 днів порівняно з контрольними зразками, ущільненими без дії магнітного поля.

Отримані результати свідчать, що підвищення ефективності орієнтування фібри можливе лише за достатньої рухомості бетонної суміші, яка забезпечує можливість перерозподілу та повороту волокон у напрямку прикладеного магнітного поля. За жорстких або малорухомих сумішей потенціал такого підходу суттєво обмежується, що вказує на необхідність узгодження технологічних параметрів суміші з методами примусової орієнтації волокон.

Результати експериментальних досліджень [10], що були проведені на призмах із звичайного бетону та СФБ, підтверджують, що додавання сталевих волокон суттєво підвищує несучу здатність зразків від дії зосереджених навантажень, змінюючи характер руйнування з крихкого на пластичний. На відміну від звичайного бетону, де критичні пошкодження з'являються при незначному ексцентриситеті, то в СФБ-зразках відбувається локалізоване тріщиноутворення в межах навантаженої зони. Після перевищення межі міцності звичайний бетон руйнувався з характерним ефектом, подібним до вибуху, утворюючи клиноподібні елементи великих розмірів – особливо за умов малої площі навантаження або значного ексцентриситету. Натомість сталевібробетон характеризувався поступовим руйнуванням із множинним розгалуженням тріщин, що є індикатором поступового досягнення граничного стану.

При центральному навантаженні зменшення площі контакту призводить до втрати цілісності бетонних зразків, тоді як сталевібробетон має вищу тріщиностійкість. Типові приклади руйнування зразків за умов центрального навантаження та з ексцентриситетом – представлено на рис. 4.



Рис. 4. Приклади руйнування бетонних і СФБ-призм за умов дії центрального навантаження та з ексцентриситетом [10]

Згідно з результатами експериментальних досліджень одеських науковців, наведених у роботі [20], встановлено, що характер руйнування фібробетонних зразків істотно залежить від об'ємного вмісту волокон. За рівня фіброармування $\mu = 0,5\%$ руйнування відбувається крихко, тоді як при вмісті волокон $\mu = 1,0\%$ і $\mu = 1,5\%$ спостерігається перехід до більш пластичного механізму руйнування. Авторами показано, що оптимальні властивості фібробетонної суміші досягаються при застосуванні бетонної матриці з крупним заповнювачем фракції ≤ 10 мм при вмісті фібри $\mu = 1,0\%$. За таких умов міцність бетону на стиск зростає у 1,35 рази, а міцність на розтяг при згині – у 3,4 рази порівняно з неармованими зразками. Крім того, введення

фібрового армування сприяє зменшенню деформацій повзучості на 21-30 % залежно від рівня прикладених напружень.

У дослідженні [21] наведено результати експериментальних досліджень несучої здатності зразків із сталевібробетону, армованих сталеву фібру різних типів (анкерної, плющеної та хвилястої) за об'ємного вмісту волокон $\mu = 1,0 \%$. За результатами встановлено, що несуча здатність суттєво не залежить від типу застосованої фібри, однак її введення принципово змінює характер руйнування матеріалу, яке відбувається поступово із формуванням наскрізних тріщин, без раптового розпаду зразків на окремі фрагменти, що свідчить про підвищення тріщиностійкості та енергоємності руйнування.

У роботі [22] досліджено вплив коефіцієнта фібрового армування за об'ємом при використанні сталеву фібру із загнутими кінцями типу HE1050 на міцність і деформативність сталевібробетону за умов короткотривалого стиску. Встановлено, що зі збільшенням об'ємного вмісту фібри зростають міцнісні характеристики матеріалу, початковий модуль пружності та відносні деформації, що відповідають піковій точці діаграми деформування, при одночасному зменшенні відносних деформацій за фіксованого рівня напружень. Отримані результати підтверджують ефективність дисперсного армування для підвищення жорсткості та деформаційної стійкості сталевібробетону. Автори також підтвердили доцільність застосування модифікованої поліноміальної залежності для аналітичного опису діаграми деформування сталевібробетону за короткотривалого стиску.

Аналіз результатів експериментальних досліджень, здійснених науковцями [23], свідчить, що зростання об'ємного вмісту сталевих волокон у бетоні підвищує його стійкість до впливу вибухового навантаження. Найвища ефективність спостерігалася у зразках із відсотком армування $\mu = 1,0 \%$ та $\mu = 1,5 \%$. Натомість суміші з $\mu = 0,5 \%$ волокон та звичайний залізобетон є малоефективними в опорі вибуховій хвилі.

Представлено на рис. 5 зовнішній вигляд експериментальних СФБ-плит з різним відсотком їх армування (від 0 % до $\mu = 1,5 \%$) після випробувань на вибухові впливи.



Рис. 5. Вплив відсотка фібрового армування на характер пошкоджень СФБ-плит [23]

Реалізовано у дослідженні [10] користувачку модель у програмному середовищі MSC Marc (комерційний програмний пакет для скінченно-елементного аналізу) із використанням багаторівневої моделювальної концепції – для чисельного аналізу поведінки сталевібробетону. Необхідні для моделювання параметри та характеристики – модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границі міцності на стиск і осьовий розтяг, – визначалися на основі експериментальних даних або обчислювалися при допомозі субмоделей. Рис. 6 ілюструє високу відповідність між числовими результатами та експериментальними даними під час центрального навантаження на площі 50×50 мм. Модель чітко відтворює пластичну поведінку СФБ – процес множинного тріщиноутворення. На відміну від вибухоподібного

розщеплення зразків без армування, СФБ-зразки поступово руйнуються з локалізацією пошкоджень, що підтверджує достовірність числової моделі.

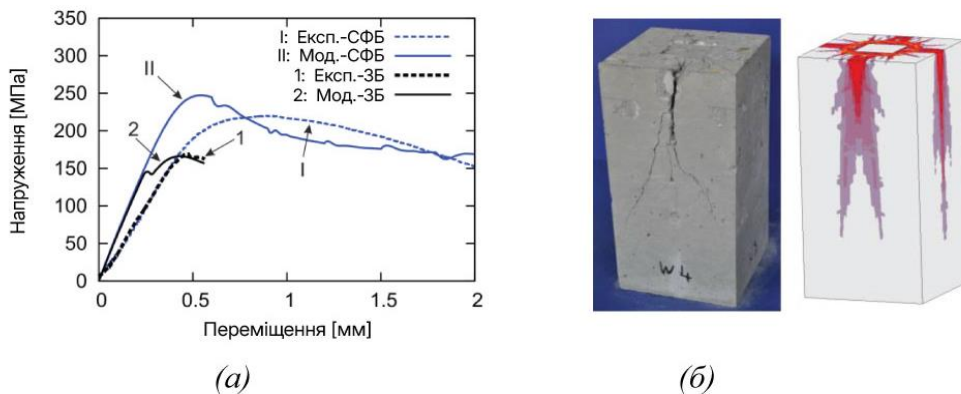


Рис. 6. Порівняння експериментальних і чисельних результатів для сталевібробетонних та звичайних бетонних зразків при центральному навантаженні:
 а – залежність напруження від переміщення для сталевібробетону та звичайного бетону;
 б – характер тріщиноутворення у зразку сталевібробетону [10]

Отримані результати вказують на перспективність числового моделювання як інструменту попередньої оцінки роботи сталевібробетонних конструкцій за умов локалізованого навантаження.

Крім сталевих фібр (рис. 1 або їх аналогів) для армування будівельних конструкцій також застосовуються волокна з інших матеріалів.

Полімерні волокна, зокрема поліпропіленові, широко застосовуються для підвищення тріщиностійкості, ударної в'язкості та довговічності бетонних конструкцій. Завдяки високій хімічній стійкості вони стійкі до корозії, сприяють зменшенню утворення усадочних тріщин на ранніх стадіях твердіння та підвищують зносостійкість бетону. Аналіз комплексних лабораторних досліджень, здійснених науковцями [7], засвідчив ефективність поліпропіленових волокон (ППФ) у складі бетону для виготовлення залізничних шпал. Встановлено, що при оптимальному дозуванні $0,7 \text{ кг/м}^3$ ППФ знижують проникність та капілярну пористість цементної матриці завдяки ефекту блокування пор, що підвищує довговічність матеріалу. Зафіксовано зменшення швидкості проходження ультразвукових хвиль, дифузії хлоридів, проникнення води та сорбційної здатності. Водночас спостерігається підвищення міцності на осьовий розтяг і розтяг при згині при незначному зниженні міцності на стиск.

У дослідженні [8] не встановлено впливу поліпропіленових волокон на міцність бетону на стиск. Але встановлено, що їх наявність підвищує ударну в'язкість, міцність на осьовий розтяг і розтяг при згині, а також терміни експлуатації. При збільшенні довжини волокон або зменшенні їх діаметра – відбувається зменшення ширини тріщин, що підтверджено як експериментально, так і аналітично – із урахуванням геометрії, типу та об'ємного вмісту волокон.

Базальтові армувальні волокна підвищують міцність бетону на осьовий розтяг і розтяг при згині, морозостійкість матеріалу, а також зменшують водопоглинання. Застосування модифікованої базальтової фібри [5] активізує утворення продуктів гідратації клінкерних мінералів на її поверхні, що покращує зчеплення волокон із цементною матрицею [6]. Згідно з результатами досліджень [2], базальтове волокно забезпечує міцність на розтяг при згині на рівні 10–13 МПа, що на 40–50 % нижче порівняно зі сталевібробетоном. Водночас воно покращує формувальні властивості бетонної суміші під час вібропресування, підвищує її однорідність і дозволяє виготовляти тонкостінні конструктивні елементи складної геометрії.

Вуглецеві волокна відзначаються надзвичайно високим модулем пружності, міцністю на розтяг при згині і стійкістю до корозії [12]. Бетони армовані вуглецевими волокнами забезпечують створення надміцних і водночас полегшених конструкцій із підвищеною міцністю на осьовий розтяг, що є важливим для реконструкції та підсилення об'єктів

інфраструктури, мостів і захисних споруд, особливо в умовах впливу агресивних середовищ. Науковцями у дослідженні [24] проаналізовано механічні властивості бетону, який армований вуглецевими волокнами (CFRC). Встановлено показники рухливості суміші, а також міцність на стиск, на осьовий розтяг при розколюванні та на розтяг при згині за об'ємного вмісту волокон 0,5; 1,0; 1,5 і 2,0 %. Збільшення вмісту волокон знижує рухливість суміші. Міцність на стиск зростала до оптимального значення при $\mu = 1,0$ % волокон (приріст 13,65 %). Подальше збільшення відсотка армування до приросту міцності не призводило. На основі отриманих науковцями результатів було сформульовано емпіричні залежності для прогнозування міцності CFRC-бетонів на стиск, осьовий розтяг та розтяг при згині.

Скловолокно знижує рухливість бетонної суміші через велику питому поверхню волокон, що підвищує внутрішній опір суміші та зменшує усадку. Згідно з результатами дослідження [25], додавання скловолокна зменшує водопоглинання та проникність в умовах впливу агресивних середовищ, покращує міцність на осьовий розтяг і розтяг при згині, а також підвищує довговічність фібробетону, особливо за умов дії хлоридів і в морському середовищі. При цьому суттєвого зростання міцності на стиск не зафіксовано. Оптимальне армування скловолокном становить $\mu = 2,0$ %; а вищі значення вимагають збільшення кількості пластифікатора. Надлишок волокон у поєднанні з високим В/Ц-відношенням призводить до збільшення кількості та розмірів пор. Бетон, армований скловолокном (GFRC), має суттєві переваги порівняно зі звичайним бетоном: приріст міцності на осьовий розтяг становить до 50 %, зменшується переріз конструктивних елементів, зменшення загальної площі тріщин – приблизно на 50 %, що забезпечує кращий захист від проникнення агресивних речовин. Крім того, знижена теплопровідність GFRC-бетонів підвищує енергоефективність конструкцій.

Дослідниками встановлено, що ефективність GFRC-армування залежить від оброблюваності суміші та рівномірного розподілу волокон: утворення «їжаків», зростання пористості чи слабе зчеплення з матрицею погіршують властивості бетону [26].

Узагальнення результатів аналізу сучасних наукових досліджень свідчить, що різні типи дисперсних волокон створюють специфічний і взаємодоповнюючий вплив на фізико-механічні та експлуатаційні властивості бетону. Сталеві волокна забезпечують найбільший приріст міцності на розтяг при згині, жорсткості та енергоємності руйнування, формуючи псевдопластичний характер деформування і підвищену тріщиностійкість матеріалу. Полімерні, зокрема поліпропіленові, волокна ефективні насамперед для контролю усадкових і експлуатаційних тріщин та підвищенні довговічності бетонних конструкцій при мінімальному впливі на міцність на стиск. Базальтові волокна забезпечують компроміс між покращенням міцнісних характеристик і технологічністю бетонної суміші, що є доцільним для тонкостінних елементів складної геометрії. Скловолокно суттєво підвищує тріщиностійкість і стійкість бетону до проникнення агресивних середовищ, однак потребує контролю реологічних властивостей суміші. Вуглецеві волокна, завдяки високому модулю пружності та корозійній стійкості, забезпечують формування надміцних і полегшених бетонних композитів за умови оптимізації об'ємного вмісту та технології приготування суміші.

Таким чином, ефективність дисперсного армування бетону визначається не лише типом волокон, але й їх геометрією, об'ємним вмістом, орієнтацією, якістю зчеплення з цементною матрицею та технологічними умовами формування суміші, що обумовлює необхідність раціонального підбору складу фібробетону відповідно до умов експлуатації конструкцій.

Перспективним напрямом удосконалення фібробетонних конструкцій є застосування наномодифікованого бетону з дисперсним армуванням. Згідно з результатами мікроскопічного аналізу зразків, здійсненого науковцями Національного університету «Львівська політехніка» (НУ «ЛП»), зруйнованих під дією ударних навантажень [9], встановлена однорідна структура цементної матриці, зміцнений контакт між цементним каменем і заповнювачем, а також хаотична орієнтація рівномірно розподілених волокон. Досягнення відповідних характеристик забезпечується наномодифікацією цементної матриці органо-мінеральними добавками, що містять ультрадисперсні мінеральні компоненти та полікарбоксилатний суперпластифікатор. У поєднанні з дисперсним армуванням це дозволяє отримати швидкотужавіючий бетон з міцністю

на стиск у межах 100–110 МПа та підвищеною тріщиностійкістю в умовах дії високошвидкісного удару. Такий ефект досягається за рахунок ущільнення структури цементного каменю, зниження В/Ц-відношення, утворення вторинних продуктів гідратації внаслідок пуцоланової реакції, зміцнення контактної зони між матрицею та заповнювачем.

Науковцями при дослідженні [27] було виготовлено чотири типи бетонних сумішей із застосуванням:

- сталевих волокон (SFRC);
- поліестерних волокон (PYFRC);
- поліпропіленових волокон (PPFRC);
- контрольна суміш – без армування (R1).

Проведено комплексну оцінку фізико-механічних властивостей затверділого бетону, зокрема його усадки, пористості, щільності, міцності на стиск, поверхневої твердості, швидкості проходження ультразвукових імпульсів, стирання, капілярного водопоглинання, глибини карбонізації та морозостійкості.

Встановлено, що тип і геометрія волокон істотно впливають на консистенцію бетонної суміші: найбільше зниження усадки (на 42 %) спостерігалось у PYFRC [27].

Пористість збільшується у всіх типах армованих бетонів, найбільше – у SFRC (на 32 %), при цьому об'ємна вага бетону істотно не змінювалась.

За результатами випробувань на стиск в SFRC встановлено приріст міцності на 12,4 %, PYFRC – на 3,4 %, тоді як у PPFRC – зниження на 4,3 % порівняно з контрольним зразком.

Поверхнева міцність збільшилася в PPFRC – на 8,04 %, а при ультразвуковому методі – для SFRC на 5,4 %. Стираність збільшилася у SFRC на 0,5 %, а в PPFRC – на 0,18 %.

Найбільше капілярне водопоглинання зафіксовано у R1, найменше – у PYFRC.

Глибина карбонізації була найнижчою у контрольного зразка, а найвищою – у SFRC (на 130,8 % більша), ймовірно, через підвищену пористість. Найвищу морозостійкість продемонстрували SFRC і PYFRC зразки. Таким чином, тип волокон суттєво впливає на експлуатаційні характеристики фібробетону: сталеві волокна покращують міцність і зносостійкість, поліестерні – морозостійкість і водонепроникність, а поліпропіленові – окремі параметри, без істотного впливу на міцність на стиск.

За результатами дослідження [28] додавання сталевих і поліпропіленових волокон у бетон для підлогових покриттів зменшує рухливість суміші та збільшує вміст повітряних пор, не впливаючи суттєво на густину матеріалу. Сталеві волокна підвищують міцність на осьовий згин, проте не впливають або дещо знижують міцність на стиск, тоді як поліпропіленові волокна (0,10 %) забезпечують меншу крихкість, вищу тріщиностійкість і є економічно доцільнішими для використання у бетонних підлогах.

Одним із ключових чинників, що визначає ефективність дисперсного армування, є довжина волокон, від якої залежить механізм їх взаємодії з цементною матрицею. Оптимальне співвідношення довжини та діаметра волокна забезпечує рівномірний розподіл напружень, ефективне зчеплення з бетоном і запобігає передчасному руйнуванню матеріалу. Надто короткі або надто довгі волокна, навпаки, можуть знижувати міцність через неефективне анкерування або утворення згустків у структурі суміші [17].

Результати досліджень [29, 30] показують, що введення поліпропіленових волокон зменшує кількість мікротріщин у бетоні та уповільнює їх розвиток. Зокрема, у роботі [29] доведено, що коротші волокна ефективніше запобігають утворенню й поширенню мікротріщин завдяки їх більшій кількості та рівномірному розподілу в бетонній матриці. Це підвищує міцність на осьовий розтяг. При збільшенні навантаження, коли мікротріщини перетворюються на макротріщини, ключову роль починають відігравати довші волокна, які забезпечують підвищення пластичності бетону та збільшення його міцності на осьовий розтяг і осьовий згин. Отримані результати підтверджують доцільність комбінованого використання волокон різної довжини для підвищення загальної тріщиностійкості елементів. На рис. 7 представлено схему роботи коротких і довгих волокон у процесі підвищення тріщиностійкості та механізмі «зшивання» тріщин.

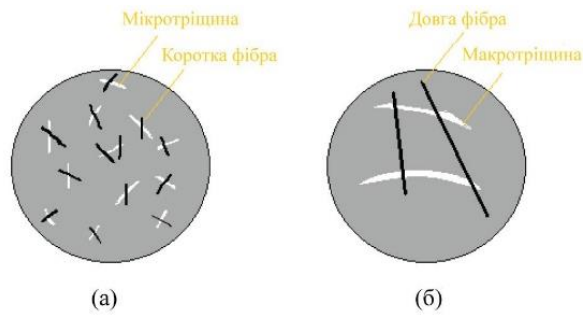


Рис. 7. Вплив: а – коротких волокон на утворення мікротріщин; б – довгих волокон – на розвиток макротріщин [29]

У роботі [29] наведено результати комплексних експериментальних досліджень, що підтверджують істотний вплив довжини поліпропіленових волокон на фізико-механічні властивості бетону. Для випробувань використовувалися волокна завдовжки 12,7 мм та 25,4 мм із різним вмістом за масою – 0 %, 0,20 %, 0,25 % і 0,30 %. Встановлено, що коротші волокна загалом забезпечували вищу міцність на осьовий стиск порівняно з довгими та контрольними зразками без армування (рис. 8), тоді як довші волокна працювали ефективніше під час осьового згину, що підтверджено результатами, наведеними на рис. 9.

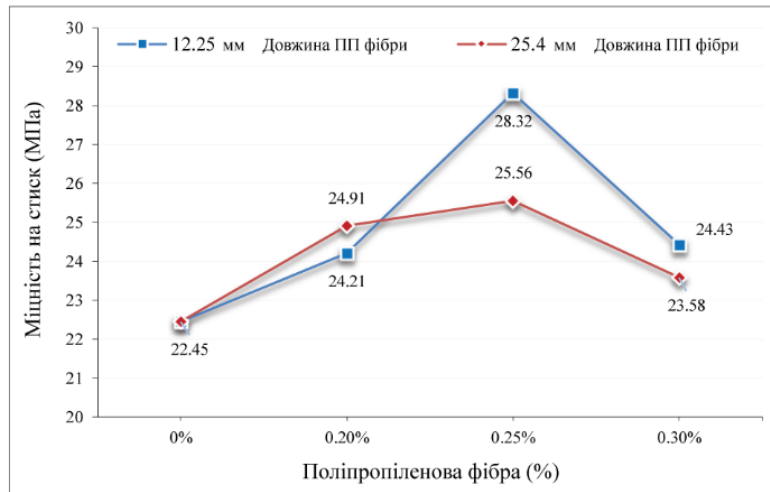


Рис. 8. Середня міцність на осьовий стиск бетону з поліпропіленовими волокнами різної довжини [29]

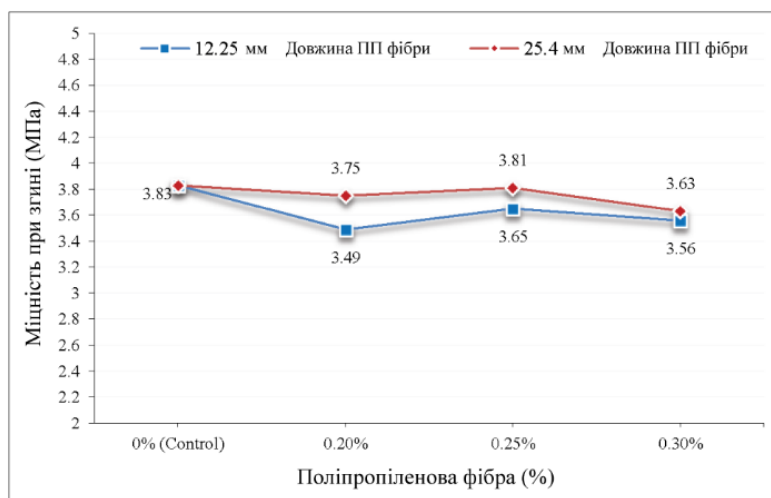


Рис. 9. Середня міцність на осьовий згин бетону з поліпропіленовими волокнами різної довжини [29]

Результати дослідження [31] підтверджують, що збільшення довжини та об'ємної частки базальтових волокон підвищує міцність бетону на стиск, осьовий згин і осьовий розтяг, а також покращує його тріщиностійкість при усадці. Водночас надмірна довжина волокон (понад 36 мм) або велика їх кількість (понад 0,40 %) знижують рухливість бетонної суміші через злипання волокон. Оптимальними параметрами визнано довжину 12–18 мм і вміст 0,10–0,15 %, за яких досягається найбільш збалансоване поєднання міцності та тріщиностійкості.

У роботі [32] досліджено вплив скляних волокон на фізико-механічні властивості бетону. Встановлено, що їх додавання підвищує міцність на стиск і розтяг, а також покращує тріщиностійкість. Волокна з меншим відношенням довжини до діаметра (коротші або товстіші) забезпечують більший приріст міцності, ніж довші тонкі волокна за однакової кількості у суміші. Використання комбінованих волокон різної довжини підвищило міцність на стиск на 21,6 %, а міцність на розтяг – на 17,5 % порівняно з неармованим бетоном. При цьому рухливість бетонної суміші зменшується із введенням волокон, особливо довших, однак при використанні комбінованих волокон спостерігається її покращення порівняно з сумішами, що містять лише довгі волокна.

Висновки. Проведений аналіз сучасних наукових досліджень засвідчує, що дисперсне армування є одним із найефективніших способів підвищення фізико-механічних та експлуатаційних характеристик бетону. Введення коротких волокон дозволяє підвищити тріщиностійкість і ударну в'язкість, покращити роботу матеріалу при розтягу (осьовому та при згині) і, залежно від типу волокон та технологічних параметрів суміші, впливати на довговічність конструкцій в умовах дії агресивних середовищ чи динамічних навантажень.

Порівняння результатів різних авторів показує, що найбільш чутливими до дисперсного армування є характеристики, пов'язані з тріщиноутворенням і руйнуванням (міцність на розтяг при згині, розвиток і ширина тріщин, енергоємність руйнування та характер деформування). Водночас щодо міцності на стиск спостерігається варіативність результатів: у низці робіт фіксується приріст, тоді як в інших – ефект є маловираженим або відсутнім. Узагальнення джерел свідчить, що такі розбіжності зумовлені не суперечністю висновків, а відмінностями у складі та технології виготовлення (В/Ц-відношення, реологія та ущільнюваність суміші, метод формування), геометрії волокон і їх зчепленні з матрицею, а також режимі навантаження та масштабному ефекті зразків/елементів.

Порівняльний аналіз показує, що сталеві волокна забезпечують найбільший приріст характеристик, пов'язаних із несучою здатністю при згині та локалізованих навантаженнях, і сприяють переходу від крихкого до більш пластичного механізму руйнування. Полімерні (поліпропіленові) волокна демонструють стабільний ефект щодо контролю усадкових і експлуатаційних тріщин та підвищення довговічності при мінімальному або непостійному впливі на міцність на стиск. Базальтові та скляні волокна є ефективними для підвищення тріщиностійкості, зниження проникності та підвищення стійкості в агресивних середовищах, однак вимагають забезпечення належної оброблюваності та рівномірного розподілу волокон. Вуглецеві волокна дозволяють формувати високомодульні композити з підвищеною міцністю при оптимізації об'ємного вмісту й технології приготування суміші, але характеризуються підвищеними вимогами до реології та розподілу армування.

Узагальнення проаналізованих джерел підтверджує, що ефективність дисперсного армування визначається не лише типом волокон, але й їх геометрією, об'ємним вмістом μ , орієнтацією, якістю зчеплення з цементною матрицею та технологічними умовами формування суміші. Практично важливо, що оптимальний рівень армування часто формується як компроміс між підвищенням механічних характеристик та забезпеченням технологічності й економічності доцільності виготовлення.

З урахуванням проведеного аналізу актуальними напрямками подальших досліджень дисперсно-армованих бетонів є:

- уніфікація підходів до оцінювання ефективності фібрового армування (порівнянні методики випробувань, критерії тріщиностійкості, енергоємності руйнування та довговічності);
- дослідження впливу технології формування (ущільнення, реологія, В/Ц, добавки) на

структуру, пористість і стабільність ефекту армування;

– розвиток методів керованої орієнтації волокон та оцінка їх ефективності залежно від рухомості суміші;

– оптимізація гібридних схем армування (поєднання різних волокон між собою та з класичною арматурою) для забезпечення потрібного балансу міцності, тріщиностійкості й довговічності;

– розроблення та валідація числових моделей (зокрема багаторівневих) з урахуванням механізмів множинного тріщиноутворення, зчеплення “матриця-волокно” та масштабного ефекту;

– дослідження дисперсно-армованих бетонів у складних режимах навантаження (удар, повторні/циклічні, вибухові, температурні) та в умовах агресивних середовищ, із фокусом на деградацію властивостей у часі;

– перспективи поєднання наномодифікації матриці з дисперсним армуванням для формування щільної мікроструктури й підвищення ранньої та довготривалої тріщиностійкості.

Таким чином, дисперсно-армований бетон є перспективним матеріалом для підвищення експлуатаційної надійності конструкцій, а подальший прогрес у цій галузі пов’язаний із узгодженням складу, технології виготовлення та розрахункових моделей з реальними умовами роботи конструкцій.

Література

1. Keras V., Augonis M., Adamukaitis N., Vaitekūnaitė E. Research of local compression concrete reinforced by steel fibers. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2015. Vol. 2, No. 11. P. 72–78. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.11.2.12568>.

2. Житковський В.В., Дворкін Л.Й. Вплив дисперсного армування на властивості дорожніх бетонів, отриманих шляхом вібропресування наджорстких сумішей. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2021. № 2(92). С. 24–31. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.0.24>.

3. Кінаш Р., Білозір В., Біденко І. Деформативність і міцність дрібнозернистого сталевібробетону за осьового розтягу. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2023. Вип. 20. С. 45–62. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/2024/STMRB/STMRB2023n20/STMRB2023n20.pdf>. (дата звернення: 06.05.2025).

4. Vijayan D. S., Sivasuriyan A., Parthiban D., Jakimiuk A., Bayat H., Podlasek A., Vaverková M. D., Koda E. A comprehensive analysis of the use of SFRC in structures and its current state of development in the construction industry. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 19. Art. 7012. <https://doi.org/10.3390/ma15197012>.

5. Дорошенко О. Ю. Базальтове волокно як компонент цементобетону. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2021. Вип. 198. С. 22–29. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256504>.

6. Дорошенко О. Ю. Вивчення властивостей дрібнозернистих цементобетонів із використанням пластифікаторів і базальтового волокна. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2023. Вип. 206. С. 72–82. DOI: 10.18664/1994-7852.206.2023.

7. Ramezani pour A. A., Esmaili M., Ghahari S. A., Najafi M. H. Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 44. P. 411–418. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.076.

8. Bagherzadeh R., Sadeghi A.-H., Latifi M. Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete. *Textile Research Journal*. 2011. Vol. 82, No. 1. P. 88–96. DOI: 10.1177/0040517511420767.

9. Марущак У. Д., Саницький М. А., Королько С. В. Наномодифіковані швидкотверднучі бетони, армовані дисперсними волокнами. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Теорія і практика будівництва. 2017. № 877. С. 137–143. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/44189> (дата звернення: 06.05.2025).

10. Breitenbücher R., Meschke G., Song F., Hofmann M., Zhan Y. Experimental and numerical study on the load-bearing behavior of steel fiber reinforced concrete for precast tunnel lining segments under concentrated loads. *Proceedings of the FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop: Fiber Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications*. 2014. P. 417–429.
11. Андрійчук О. В., Кислюк Д. Я., Нінічук М. В. Визначення несучої здатності нормальних перерізів комбіновано-армованих сталевібробетонних згинальних елементів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2020. Вип. 13. С. 13–23. DOI: 10.36910/6775-2410-6208-2020-3(13)-02.
12. Awoyera P. O., Effiong J. U., Olalusi O. B., Arunachalam K. P., de Azevedo A. R. G., Martinelli F. R. B., Monteiro S. N. Experimental Findings and Validation on Torsional Behavior of Fibre-Reinforced Concrete Beams: A Review. *Polymers*. 2022. Vol. 14, No. 6. Art. 1171. DOI: 10.3390/polym14061171.
13. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016. Настанова з проєктування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. Київ : Мінрегіон України, 2016.
14. Andriichuk O. V., Babych E. M. Strength of elements with annular cross sections made of steel-fiber-reinforced concrete under one-time loads. *Materials Science*. 2017. Vol. 52, No. 4. P. 509–513. DOI: 10.1007/s11003-017-9983-z.
15. Бабич Є. М., Андрійчук О. В. Проєктування та виготовлення безнапірних труб із сталевібробетону : рекомендації. Луцьк : ЛНТУ, 2012. 32 с.
16. Андрійчук О. В., Ясюк І. М. Виготовлення придорожніх лотків водовідводу зі сталевібробетону. *Наукові нотатки: Луцький НТУ*, 2014. Вип. 45. С. 7–14.
17. Андрійчук О. В. Робота і розрахунок елементів кільцевого перерізу зі сталевібробетону при повторних навантаженнях : дис. канд. техн. наук : 05.23.01. Львів, 2011. 156 с.
18. Xue W., Chen J., Xie F., Feng B. Orientation of steel fibers in magnetically driven concrete and mortar. *Materials*. 2018. Vol. 11, No. 1. Art. 170. DOI: 10.3390/ma11010170.
19. Дворкін Л. Й., Ковальчук Т. В. Оптимізація складу високоміцного сталевібробетону. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2016. № 32. С. 45–54.
20. Korneeva I., Neutov S., Suriyaninov M. Experimental studies of fiber concrete creep. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 116. Art. 02021. 6 p. DOI: 10.1051/mateconf/201711602021.
21. Сур'янінов М. Г., Неутов С. П., Корнеєва І. Б., Величко Д. В. Несуча здатність сталевібробетону з фіброю різного типу. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2020. № 2(49). С. 18–24. DOI: 10.31471/1993-9965-2020-2(49)-18-24.
22. Біденко І. Механічні характеристики сталевібробетону, армованого фіброю типу HE1050, за короткотривалого стиску. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія: Архітектура та будівництво*. 2023. Вип. 24. С. 65–73. DOI: 10.31734/architecture2023.24.065.
23. Yusof M. A., Norazman N., Ariffin A., Mohd Zain F., Risby R., Ng C. Normal strength steel fiber reinforced concrete subjected to explosive loading. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*. 2011. Vol. 1, No. 2. P. 127–136.
24. Bowling J. Mechanical properties of carbon-fiber-reinforced concrete. *Advances in Civil Engineering Materials*. 2019. Vol. 8. Art. ID 20180089. DOI: 10.1520/ACEM20180089.
25. Ahmad J., González-Lezcano R. A., Majdi A., Ben Kahla N., Deifalla A. F., El-Shorbagy M. A. Glass fibers reinforced concrete: overview on mechanical, durability and microstructure analysis. *Materials*. 2022. Vol. 15. Art. 5111. DOI: 10.3390/ma15155111.
26. Blazy J., Blazy R., Drobiec Ł. Glass fiber reinforced concrete as a durable and enhanced material for structural and architectural elements in smart city—a review. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 8. Art. 2754. DOI: 10.3390/ma15082754.
27. Bolat H., Şimşek O., Çullu M., Durmuş G., Can Ö. The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. *Composites: Part B*. 2014. Vol. 61. P. 191–198. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.01.043.
28. Chajec A., Sadowski Ł. The effect of steel and polypropylene fibers on the properties of horizontally formed concrete. *Materials*. 2020. Vol. 13. Art. 5827. DOI: 10.3390/ma13245827.

29. Memon I. A., Jhatial A. A., Sohu S., Lakhiar M. T., Hussain Z. Influence of fibre length on the behaviour of polypropylene fibre reinforced cement concrete. *Civil Engineering Journal*. 2018. Vol. 4, No. 9. P. 2138–2147. DOI: 10.28991/cej-03091144.
30. Hadiprama J., Abdul Samad A. A., Zhao Z. J., Mohammad N., Wirdawati W. Compressive strength of foamed concrete reinforced with polypropylene fibre. *Advanced Materials Research*. 2012. Vols. 488–489. P. 253–257. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.253.
31. Wang X., He J., Mosallam A. S., Li C., Xin H. The effects of fiber length and volume on material properties and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete (BFRC). *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. Art. ID 7520549. 17 p. DOI: 10.1155/2019/7520549.
32. Behera G. C., Panda S., Kanda P. Effect of length of fibers on mechanical properties of normal strength concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 970. Art. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/970/1/012020.

References

- [1] V. Keras, M. Augonis, N. Adamukaitis, and E. Vaitekūnaitė, "Research of local compression concrete reinforced by steel fibers", *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, vol. 2, no. 11, pp. 72–78, 2015. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.11.2.12568>.
- [2] V.V. Zhytkovskyi and L. Y. Dvorkin, "Vplyv dyspersnoho armuvannia na vlastyvoli dorozhnikh betoniv, otrymanykh shliakhom vibropresuvannia nadzhorstkykh sumishei", *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*, no. 2(92), pp. 24–31, 2021. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.0.24>.
- [3] R. Kinash, V. Bilozir, and I. Bidenko, "Deformatyvni i mitsni dribnozernystoho stalefibrobetonu za osiovoho roztyahu", *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*, no. 20, pp. 45–62, 2023. [Online]. Available: <https://files.znu.edu.ua/files/2024/STMRB/STMRB2023n20/STMRB2023n20.pdf> Accessed on: May 6, 2025.
- [4] D.S. Vijayan, A. Sivasuriyan, D. Parthiban, A. Jakimiuk, H. Bayat, A. Podlasek, M.D. Vaverková, and E. Koda, "A comprehensive analysis of the use of SFRC in structures and its current state of development in the construction industry", *Materials*, vol. 15, no. 19, 7012, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15197012>.
- [5] O.Yu. Doroshenko, "Bazaltove volokno yak komponent tsementobetonu", *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT*, no. 198, pp. 22–29, 2021. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256504>.
- [6] O. Yu. Doroshenko, "Vyvchennia vlastyvostei dribnozernystykh tsementobetoniv iz vykorystanniam plastyfikatoriv i bazaltovoho volokna", *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT*, no. 206, pp. 72–82, 2023. DOI: 10.18664/1994-7852.206.2023.296773.
- [7] A.A. Ramezaniapour, M. Esmaeili, S.A. Ghahari, and M. H. Najafi, "Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristics of concrete for application in sleepers", *Construction and Building Materials*, vol. 44, pp. 411–418, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.076.
- [8] R. Bagherzadeh, A.-H. Sadeghi, and M. Latifi, "Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete", *Textile Research Journal*, vol. 82, no. 1, pp. 88–96, 2011. DOI: 10.1177/0040517511420767.
- [9] U.D. Marushchak, M.A. Sanytskyi, and S.V. Korolko, "Nanomodyfikovani shvydkotverdnuhi betony, armovani dyspersnyimi voloknami", *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Seriya: Teoriia i praktyka budivnytstva*, no. 877, pp. 137–143, 2017. [Online]. Available: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/44189>. Accessed on: May 6, 2025.
- [10] R. Breitenbücher, G. Meschke, F. Song, M. Hofmann, and Y. Zhan, "Experimental and numerical study on the load-bearing behavior of steel fiber reinforced concrete for precast tunnel lining segments under concentrated loads", *FRC 2014 Joint ACI-fib Int. Workshop: Fiber Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications*, 2014, pp. 417–429.

- [11] O.V. Andriichuk, D.Ya. Kysliuk, and M.V. Ninichuk, "Vyznachennia nesuchoi zdatnosti normalnykh pereriziv kombinovano-armovanykh stalefibrobetonnykh zhynalnykh elementiv", *Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*, no. 13, pp. 13–23, 2020. DOI: 10.36910/6775-2410-6208-2020-3(13)-02.
- [12] P. O. Awoyera, J. U. Effiong, O. B. Olalusi, K. P. Arunachalam, A. R. G. de Azevedo, F. R. B. Martinelli, and S. N. Monteiro, "Experimental findings and validation on torsional behavior of fiber-reinforced concrete beams: A review", *Polymers*, vol. 14, no. 6, 1171, 2022. DOI: 10.3390/polym14061171.
- [13] DSTU-N B V.2.6-218:2016. Nastanova z proektuvannia ta vyhotovlennia konstruksii z dyspersnoarmovanoho betonu, Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2016.
- [14] O.V. Andriichuk and E.M. Babych, "Strength of elements with annular cross sections made of steel-fiber-reinforced concrete under one-time loads", *Materials Science*, vol. 52, no. 4, pp. 509–513, 2017. DOI: 10.1007/s11003-017-9983-z.
- [15] E.M. Babych and O.V. Andriichuk, Proektuvannia ta vyhotovlennia beznapirnykh trub iz stalefibrobetonu: Rekomendatsii, Lutsk: LNTU, 2012, 32 p.
- [16] O.V. Andriichuk and I.M. Yasiuk, "Vyhotovlennia prydozhnikh lotkiv vodovidvodu zi stalefibrobetonu", *Naukovi notatky*, no. 45, pp. 7–14, 2014.
- [17] O.V. Andriichuk, Robota i rozrakhunok elementiv kil'tsevoho pererizu zi stalefibrobetonu pry povtornykh navantazhenniakh: dis. ... k-ta tekhn. nauk., 05.23.01, Lviv, 2011.
- [18] W. Xue, J. Chen, F. Xie, and B. Feng, "Orientation of steel fibers in magnetically driven concrete and mortar", *Materials*, vol. 11, no. 1, 170, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/1/170>. Accessed on: May 4, 2025.
- [19] L.J. Dvorkin and T.V. Kovalchuk, "Optyimizatsiia skladu vysokomitsnoho stalefibrobetonu", *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy*, no. 32, pp. 45–54, 2016.
- [20] I. Korneeva, S. Neutov, and M. Suriyaninov, "Experimental studies of fiber concrete creep", *MATEC Web of Conferences*, vol. 116, Art. no. 02021, 6 pp., 2017. doi: 10.1051/mateconf/201711602021.
- [21] M. H. Suriianinov, S. P. Neutov, I. B. Korneieva, and D. V. Velychko, "Nesucha zdatnist stalefibrobetonu z fibroi riznogo typu", *Naukovyi visnyk IFNTUNG*, no. 2(49), pp. 18–24, 2020. doi: 10.31471/1993-9965-2020-2(49)-18-24.
- [22] I. Bidenko, "Mekhanichni kharakterystyky stalefibrobetonu, armovanoho fibroi typu NE1050, za korotkotrivaloho stysku", *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu pryrodokorystuvannia. Serii: Arkhitektura ta budivnytstvo*, no. 24, pp. 65–73, 2023. doi: 10.31734/architecture2023.24.065.
- [23] M.A. Yusof, Norazman Ariffin, F.M. Zain Risby, and C.P. Ng, "Normal strength steel fiber reinforced concrete subjected to explosive loading", *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology*, vol. 1, no. 2, 2010.
- [24] J. Bowling, "Mechanical properties of carbon-fiber-reinforced concrete", *Advances in Civil Engineering Materials*, vol. 8, 20180089, 2019. DOI: 10.1520/ACEM20180089.
- [25] J. Ahmad, R. A. González-Lezcano, A. Majdi, N. Ben Kahla, A.F. Deifalla, and M.A. El-Shorbagy, "Glass fibers reinforced concrete: Overview on mechanical, durability and microstructure analysis", *Materials*, vol. 15, 5111, 2022. DOI: 10.3390/ma15155111.
- [26] J. Blazy, R. Blazy, and Ł. Drobiec, "Glass fiber reinforced concrete as a durable and enhanced material for structural and architectural elements in smart cities—A review", *Materials*, vol. 15, no. 8, 2754, 2022. DOI: 10.3390/ma15082754.
- [27] H. Bolat, O. Şimşek, M. Çullu, G. Durmuş, and Ö. Can, "The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete", *Composites: Part B*, vol. 61, pp. 191–198, 2014. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.01.043.
- [28] A. Chajec and Ł. Sadowski, "The effect of steel and polypropylene fibers on the properties of horizontally formed concrete", *Materials*, vol. 13, art. 5827, 2020. DOI: 10.3390/ma13245827.
- [29] I. A. Memon, A. A. Jhatial, S. Sohu, M. T. Lakhari, and Z. Hussain, "Influence of fibre length on the behaviour of polypropylene fibre reinforced cement concrete", *Civil*

- Engineering Journal*, vol. 4, no. 9, pp. 2138–2147, 2018. DOI: 10.28991/cej-03091144.
- [30] J. Hadiprama, A.A. Abdul Samad, Z.J. Zhao, N. Mohammad, and W. Wirdawati, "Compressive strength of foamed concrete reinforced with polypropylene fibre", *Advanced Materials Research*, vols. 488–489, pp. 253–257, 2012. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.253.
- [31] X. Wang, J. He, A. S. Mosallam, C. Li, and H. Xin, "The effects of fiber length and volume on material properties and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete (BFRC)", *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 7520549, 17 pp., 2019. DOI: 10.1155/2019/7520549.
- [32] G. C. Behera, S. Panda, and P. Kanda, "Effect of length of fibers on mechanical properties of normal strength concrete", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 970, 012020, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/970/1/012020.

EFFECT OF DISPERSED REINFORCEMENT ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE: A REVIEW

¹Andriichuk O.V., Ph.D., Associate Professor,
o.andriichuk@lntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6275-097X
¹Hromov D.Y., postgraduate,
hromov.d2711@lntu.edu.ua, ORCID: 0009-0006-7862-6662
¹Lutsk National Technical University
Lvivska St., 75, Lutsk, 43018, Ukraine

Abstract. Modern service conditions of concrete structures impose increasingly stringent requirements on their physico-mechanical properties, including strength, crack resistance, impact toughness, and wear resistance, as well as durability under aggressive environmental exposure. A promising approach to improving the serviceability and operational reliability of concrete structures is the use of dispersed reinforcement, which involves the uniform distribution of short fibers within the concrete matrix. This approach reduces crack width and limits crack propagation, increases fracture energy, improves stress redistribution, and ensures reliable performance under dynamic and impact loading.

This paper presents a review of domestic and international studies on the influence of different types of fibers, such as steel, polymer, basalt, glass, and carbon on the main strength characteristics of concrete, including compressive strength, axial tensile strength, flexural tensile strength, and resistance to impact loading, as well as on durability-related properties such as water impermeability, frost resistance, and chemical resistance. It is shown that the effectiveness of dispersed reinforcement is largely determined by fiber geometry and mechanical properties, loading conditions, service environment, fiber orientation, and the quality of the bond between fibers and the cement matrix. Experimental results on the application of fiber-reinforced concrete in road infrastructure elements (drainage channels, gravity pipes, and shell structures), railway sleepers, and structures with enhanced blast resistance are summarized.

Particular attention is given to the combined use of dispersed and conventional reinforcement to improve load-bearing capacity and optimize the dimensions of structural elements. The prospects for integrating dispersed reinforcement with a nanomodified cement matrix, characterized by an improved microstructure, enhanced crack resistance, and accelerated hardening, are also discussed.

Keywords: fiber-reinforced concrete, dispersed reinforcement, physical and mechanical properties, crack resistance, durability, dynamic loading.

Стаття надійшла до редакції 2.12.2025
Стаття прийнята до друку 15.02.2026
Дата публікації статті 20.03.2026

This work © 2026 by Андрійчук О.В., Громов Д.Ю. is licensed under CC BY 4.0

PRACTICAL CASES OF RECYCLING SECONDARY GLASS IN BUILDING

¹Yelisieieva M.O., PhD,Yelisieieva.M.O@nmu.one, ORCID: 0009-0002-7112-9904¹*Dnipro University of Technology*

19, Dmytro Yavornytskyi av., Dnipro, 49005, Ukraine

²Shylo O.M.,shilo2040@gmail.com, ORCID: 0009-0005-7967-1468²*Melitopol State Pedagogical University named after Bohdan Khmelnytsky*

59, Naukovoho Mistechka St., Zaporizhzhia, 69000, Ukraine

Abstract. For Ukraine, the issue of waste management and recycling remains one of the most pressing environmental problems. Glass waste accounts for a significant proportion of the total mass of solid household waste. At the same time, glass does not decompose in natural conditions, which creates a long-term burden on the environment. However, it has the potential to be a promising raw material that can be recycled without losing its basic physical and chemical properties. In this regard, the issue of recycling secondary glass is particularly relevant, especially in the construction industry, which is the main consumer of natural resources (about 50%) and therefore needs to introduce technologies that use alternative raw materials.

This will contribute to reducing the environmental impact, rational use of resources and increasing the economic efficiency of construction. The aim of the work is to determine the effectiveness and feasibility of implementing successful global practices of using recycled glass for the production of building materials in the current conditions of Ukraine.

The analysis of scientific works has revealed the most successful cases of glass recycling for the production of building materials in global practice. The production of asphalt concrete mixtures with the addition of 10–30% glass cullet (glasphalt), thermal insulation materials based on foam glass, lightweight concrete with micro-crushed glass as a partial substitute for sand, and finishing materials such as decorative panels and mosaics made of coloured glass chips. In Ukraine, despite the availability of production capacities, the level of glass reuse remains low due to the underdeveloped infrastructure for the collection, sorting and cleaning of glass waste. However, the growing demand for building materials in the post-war reconstruction process creates favourable conditions for scaling up such technologies.

To implement global experience in the use of recycled glass for the production of building materials in Ukraine, the following steps must be taken:

1. Improve the regulatory framework, namely, initiate amendments and develop a series of state building codes and harmonise them with the requirements of the European Committee for Standardisation regarding the use of secondary raw materials in construction.

2. Introduce economic incentives by establishing tax breaks for manufacturers of building materials based on secondary mineral raw materials and giving priority in public procurement to materials containing such raw materials.

3. Create a regional infrastructure for the collection, sorting and processing of recycled glass.

4. Conduct social and informational events.

5. Given the needs of Ukraine's post-war reconstruction, the highest priority is to establish the production of thermal insulation materials (foam glass) to improve the energy efficiency of buildings; develop concrete mixtures based on recycled glass for 3D printing of building structures as an alternative rapid technology for restoring destroyed buildings, and develop materials based on recycled glass for road construction.

Keywords: recycled glass; cullet; recycling; construction materials; green construction.

Introduction. One of the global challenges of humanity is the intensive accumulation of industrial and solid household waste, a significant part of which is glass. According to international

environmental reports, up to 10% of the total mass of household waste is glass waste. However, the level of their recycling in countries around the world, including Ukraine, remains insufficient.

It is common knowledge that glass practically does not decompose in natural conditions, which creates an ecological threat for our planet. At the same time, It is also worth mentioning that this material has a unique feature – the ability to be recycled without significant loss of its physical and chemical properties with further use, including construction.

Today, one of the key vectors of the development of modern construction is waste minimization and reuse of material resources, as this has not only economic but also environmental advantages. In the conditions of sustainable growth of solid household waste and depletion of natural resources, recycling of secondary glass as an alternative raw material in the production of construction materials is of particular importance.

In addition, the modern technology of glass production from natural raw materials is quite energy-intensive and has a high carbon footprint on the environment. The technological operation of glass making in bath furnaces, namely heating natural raw materials in furnaces to a temperature of 1400 – 1500 °C, accounts for about 75-85% of the total energy requirements for glass production [1–2]. Accordingly, during this process, large amounts of greenhouse gas emissions occur. Therefore, the use of cullet during the production of construction materials will contribute not only to reduce the consumption of natural resources, but also to reduce energy costs and CO₂ emissions into the atmosphere.

Despite the significant potential for reuse of glass waste, there are still problems in the practical implementation of glass recycling. They are caused both by technical factors (quality of cleaning, fractionation, etc.) and organizational and economic factors – the lack of state incentives, low level of waste sorting, etc. However, this area is actively developing due to the introduction of new technologies, increased environmental awareness of society and support from European institutions in this area. World experience demonstrates the effectiveness of using recycled glass in the production of concrete, asphalt-concrete mixtures, heat-insulating materials, decorative elements, etc. [3–7].

For Ukraine, the issue of waste management and recycling remains one of the most acute environmental problems. Therefore, international experience in such practices is particularly valuable for our country, especially in the context of post-war reconstruction.

That is why the study of practical cases of recycling recycle glass in construction is an urgent task for scientists and industry specialists. Analysis of successful examples of using glass waste in different countries, comparison of technological solutions and identification of factors ensuring the effectiveness of their implementation will allow to form a basis for the development of a national system of "green" construction. This, in turn, will contribute to reduce the environmental load, rational use of resources and increasing the economic efficiency of construction.

Analysis of recent research. The topic of reuse glass waste in construction is being actively studied by both Ukrainian and foreign scientists. Researchers emphasize that recycled glass is an effective alternative raw material for creating environmentally safe, energy-efficient and economically profitable building materials.

Thus, the Ukrainian scientists in their works [8–10] note that the existing glass processing capacities do not correspond to the volumes of its accumulation, while the recycling of construction waste in the context of the reconstruction of Ukraine takes on its significance. The authors emphasize the need to create modern glass processing systems by solving the main problems that hinder this, namely: the lack of legal documents that would regulate the rules for the use of glass waste, shortcomings in the waste collection infrastructure and insufficient involvement of industry. The transition to effective technologies is possible only with the coordination and cooperation of representatives of state policy, science and business in Ukraine.

The most common practices of using recycled glass are: road construction, thermal insulation materials, production of concrete mixtures and decorative trim. The scientists considered in detail [2, 6, 11–14], the effect of introducing recycled glass in the manufacture of various road construction materials, namely asphalt-concrete, base and subbase of road pavement, stabilizing component of soil. First of all, the researches are aimed at selecting the optimal granulometric composition of these materials from recycled glass.

The issue of improving the production technologies of such a thermal insulation material as

foam glass from recycled glass is considered in [15–17], and various finishing materials in [3].

A large number of works [2, 4, 5; 18–20] are devoted to the development of the optimal composition of concretes based on recycled glass, which can be used both as a substitute for the binding component and as a substitute for aggregates for concrete. Of particular interest are the works [21–22], which examine the influence of recycled glass on the rheological properties of concrete mixtures used in the innovative technology of 3D printing of buildings.

The purpose of the work is to determine the effectiveness and feasibility of implementing successful world practices of using recycled glass for the production of construction materials in modern Ukrainian conditions.

Materials and research methods. The work uses a comprehensive approach, which includes analytical, comparative and generalizing research methods. At the first stage, scientific data on the relevance of glass recycling were collected, at the second stage, a comparative analysis of foreign and Ukrainian experience in the issue of recycling glass was done, successful promising technologies with the highest level of environmental and economic effect were identified. At the third stage, a generalized model of the introduction of glass recycling technologies into the national construction industry was formed, taking into account technical, organizational and social factors.

Research results. Recycled glass (cullet) is glass waste that is formed during the production and consumption process and is re-involved in the production cycle. Glass recycling is one of the most developed areas of waste processing. Analysis of scientific works has allowed us to establish that the justification for the use of recycled glass includes several aspects, namely: economic, environmental, technological and, to a lesser extent, design aspects (Fig. 1).



Fig. 1. Key aspects of the feasibility of glass recycling

The economic aspect is to reduce production costs by partially (or completely) replacing primary raw materials with secondary materials. The use of cullet in the production process allows reducing energy costs, reducing time and costs associated with the extraction and transportation of natural resources, thus reducing the cost of finished products. In addition, this process allows creating new workplaces, thus strengthening the country's economy.

In turn, the ecological aspect consists in reducing the amount of waste that ends up in landfills, reducing the ecological load on the environment.

The technological aspect is manifested in the possibility of improving the properties of construction materials by introducing cullet into their composition. With the correct adjustment of the production technology, crushed glass can increase the strength and durability of concrete mixtures, etc.

The design potential of recycled glass opens up new possibilities for architectural and decorative solutions. Due to the variety of colors and textures, cullet is used in the manufacture of mosaics, facade panels, decorative tiles, interior decoration and landscaping elements.

Thus, recycled glass is a multifunctional resource that combines economic feasibility, environmental safety, technological efficiency, and aesthetic appeal, making it an extremely promising raw material for the construction industry.

Modern recycling technologies allow the use of cullet in many areas of the construction industry – from the production of new glass materials (products) to the creation of other construction materials, including decorative ones.

One of such technologies is the use of glass as a raw material. Crushed glass is used in the production of sheet, facade, container glass, as well as fiberglass and glass wool. This allows you to

lower the melting point, reduce energy consumption and the amount of carbon dioxide emissions into the environment, which makes this process ecologically and economically feasible.

Next, we will consider the use of recycled glass in the production of construction thermal insulation materials. Yes, it is the main raw material for the production of foam glass, which is used as a lightweight and fire-resistant insulation in industrial and residential construction. Glass wool is also made from cullet, which is an effective thermal insulation material.

In addition, crushed glass is used in the production of concrete and road surface materials (asphalt concrete, bases and subbases), in which it is usually added as a partial substitute for sand or crushed stone.

The use of cullet also opens new opportunities in ornamental decoration – colored glass chips are added when creating various mosaics, facing slabs, landscape elements, facades, etc.

From the above, we can conclude that the use of recycled glass has a significant number of practical cases in construction. Particular attention should be paid to their use in overseas practice.

Glasphalt (asphalt with glass added) is an asphalt-concrete mixture where part of the filler is replaced with crushed glass. The history of the development of this technology began in the 1970s. Today, it is used in a number of high-tech countries, in particular Japan, Canada, the USA and EU countries. In practice and in scientific research, a number of advantages of using cullet in road construction have been proven, the main of which are the following: reducing the percentage of primary raw material use, recycling of glass waste, reducing cost and improving the properties of asphalt pavement. It should be noted that there is no unified technology and formula for using cullet as alternative filler. Scientists are still working on improving this technology [2, 6, 13–14]. Thus, studies of dynamic behavior have shown that asphalt-concrete containing cullet has better resistance to deformation and higher stiffness modulus [11].

The company RMC Materials, under the Highway Authorities Product Approval Scheme (HAPAS), uses approximately 30% recycled glass in its product, instead of natural aggregates. HAPAS is a British certification scheme that certifies that materials, products and systems used in the construction of highways meet strict requirements for quality, safety and durability. Completing that certification allows the developed material to be used for road construction on all highways, including trunk roads. A three-year HAPAS evaluation scheme confirmed the high effectiveness of the developed Glasphalt compound in operation compared to traditional asphalt from natural crushed stone [12].

Laboratory tests of asphalt-concrete mixtures with the addition of 10-15% cullet (monolithic and tempered glass) have shown that the properties of the mixture change as follows: stiffness decreases, and resistance to permanent deformation decreases. Practice has shown that the content of 10-20% cullet improves wear resistance and roughness of the road surface [6].

A study of Algerian scientists [13] is devoted to the use of recycled glass to grain size correction of pavement unbound granular material (base and subbase). Crushed limestone of the 0–20 mm fraction, which has a deficiency of fine particles, was used as the reference material. The addition of 10% of recycled glass of the 0-0.63 mm fraction significantly improves the granulometric curve of the mixture, fitting it into the regulatory area for the road base. This, in turn, contributes to an increase in the bearing capacity of the material. In addition, a mixture of limestone crushed stone and recycled glass has a filtration coefficient 10 times higher than a mixture of limestone crushed stone and sand. This indicates better drainage and a reduced risk of water accumulation. As a result, this contributes to an increase in the drainage capacity of the road pavement and its durability, even in wet conditions.

Piyush Punetha and Sanjay Shrawan Nimbalkar [14] propose to make the base and subbase of the road surface entirely from recycled materials. It is recommended to combine recycled crushed glass in an amount of 10–30% with recycled concrete aggregate. The article provides a comprehensive assessment of the physical and mechanical properties of secondary aggregates, namely recycled concrete aggregate, crushed brick and crushed glass in the context of flexible road surface construction. It has been proven that road surfaces constructed using aggregates from recycled mineral raw materials have characteristics comparable to those constructed from natural quarry materials. At the same time, they allow to solve the problem of a sharp increase in the amount of construction and demolition waste (the construction and demolition waste or C&D waste for short), the limitation of natural resources and the need for sustainable materials for road construction.

Abderrahim Lakhout in his work [2] also suggests using crushed recycled glass for soil stabilization, which improves the bearing capacity of the road surface and prevents its erosion. The

laboratory studies have shown that soil mixed with 10-30% glass particles has increased shear strength and reduced settlement, making it a viable alternative for sustainable road construction and foundation materials. At the same time, the author draws attention to the need for scientific research to develop advanced technologies for processing of recycled glass. The diversity of quality and composition of recycled glass can create difficulties when using it as a construction material. Impurities in glass can negatively affect the characteristics of products made from it, which confirms the need to develop advanced technologies for sorting, cleaning and crushing recycled glass. Optimization of these technologies will ensure that recycled glass meets the high standards applicable in the field of construction materials and will help to increase its stability and quality, contributing to its competitiveness with natural materials.

However, there are also certain disadvantages in the use of recycled glass, namely the cost of production, which may be higher. This is due to the fact that to obtain a high-quality final product, such raw materials require preliminary sorting and cleaning, a procedure for assessing the quality of raw materials and the availability of appropriate equipment, infrastructure and logistics. In addition, if the technology for manufacturing asphalt concrete based on recycled glass is not followed, risks may arise during road operation: reduced adhesion of the coating, the need for frequent road repairs, etc.

The next successful case of using recycled glass is the production of foam glass (*foam glass* or *cellular glass*) based on it – an inorganic insulation with a highly porous structure. It is obtained by heating the glass mass to a temperature at which the glass becomes plastic and can foam when a small amount of special gas-forming additives is added, forming closed or partially closed pores. Due to this porous structure, this material has high heat and sound insulation properties, is moisture resistant and durable, which ensures its service life of 100 years or more. Having a number of advantages, such as reducing the total percentage of glass in the mass of waste, reducing the final cost of products, this material becomes attractive in the construction industry.

Thus, in developed countries, foam glass is used as an ecological alternative to insulation, and manufacturing technologies are constantly being improved. A number of scientific studies have provided the advantages of using foam glass in the construction industry. In particular, Horonko et al. in their study [15] claim that foam glass made from recycled glass and perlite has a density of 263 kg/m³, a strength of 2.17 MPa and low thermal conductivity, which allows it to be used as a thermal insulation layer.

The most well-known manufacturers of foam glass in European countries are GLAPOR (Germany) and Misapor (Switzerland). The first mentioned company makes its product from 100% recycled glass [16], while the second notes that its material is successfully used as a filling for floor bases, thus reducing the load on the soil [17].

Another common world practice is the use of recycled glass in the production of various types of concrete. With proper technology for preparing cullet (reduction of fraction, control of reactivity), it is possible to obtain concrete with sufficiently high strength, decorative effect and reduced average density. The first attempts to introduce crushed glass into concrete date back to the 1960s and 1970s, but widespread industrial use began with the advent of glass grinding technology to micropowder in the 21st century. This made it possible to avoid the negative consequences of alkali-silicate reaction (ASR), which previously limited its use in the manufacture of cement materials.

Modern researches show that the selection of the optimal granulometry of crushed glass can significantly increase the strength of concrete. Gengan et al. [4] found that replacing up to 20% of natural aggregate with cullet improves the strength of concrete. The optimal results were obtained at a ratio of 15 – 20%. The same thesis is confirmed in the work of Abderrahim Lakhout [2], in which, due to the addition of 20% of recycled glass instead of traditional aggregates in concrete, the compressive strength increased by 15%, and carbon emissions decreased by approximately 30%. In addition, the author suggests using finely ground glass powder as an additional cementing material, which will allow reducing the proportion of cement in the composition of concrete. For this, in order to improve the properties of glass powder, it is necessary to carry out chemical or combined activation. The use of processed secondary glass powder in concrete allowed improving its microstructure, reducing porosity, increasing early and final strength, and minimizing the risk of alkali-silica reaction.

In another experiment [5], expanded glass was used as a lightweight aggregate for concretes with a reduced density (1.5–2.2 g/cm³) while obtaining strengths of 18–69 MPa. Such concretes

demonstrate increased thermal insulation and lower weight, which are valuable operational properties of the material for energy-efficient construction.

Lutfar Rahman Rana et al. [18] conducted research on the replacement of fine aggregate in concrete with secondary crushed glass and coarse aggregate with recycled brick aggregate (Recycled brick aggregate concrete or RBAC). It was found that with an increase in the proportion of RBAC, the compressive strength of concrete decreases. This negative effect of RBAC was eliminated and its quality improved by adding 20% secondary glass as fine aggregate.

In the study of Subhan Ahmad et al. [19], the positive effect of recycled crushed glass (RCG) on the quality of concretes in which a proportion of natural coarse aggregate was replaced by recycled coarse aggregate (RCA), in this case made from concrete of a destroyed building. It was found that RCA significantly reduces the mobility of the concrete mixture due to the presence of mortar particles in it, which increase the water absorption of such aggregate, which negatively affects the formation of the concrete structure and its strength characteristics. RCG, which is added to concrete as a substitute for part of the fine aggregate, has a smooth surface and almost does not absorb water, therefore it improves the technological properties of concrete mixtures. The early strength of concretes made with the addition of RCG and RCA at any ratios was lower than that of concretes made from natural aggregates. However, the late strength, namely the 56-day strength of concrete increases in all mixtures made from Recycled aggregates (aggregates from recycled materials). This is explained by the fact that recycled crushed glass densifies the structure of the concrete and promotes the reaction with the silica content in the glass. The best indicators were recorded when 20% RCG was added instead of natural fine aggregate and 50% RCA was added instead of natural coarse aggregate. This composition allowed to obtain a reinforced concrete beam that had a 5% higher shear strength than a beam made from a control concrete mixture without Recycled aggregates.

Also of interest are the studies of Chinese scientists [20] aimed at developing ecological concrete, which is modified with recycled glass powder (Waste glass powder or GP) as an auxiliary cement material, recycled concrete aggregate (Recycled concrete aggregate or RCA) as a coarse aggregate particle and recycled fine brick aggregate (Recycled fine brick aggregate or RFBA) from waste clay bricks as a fine aggregate particle. The following ratio of materials in the concrete mixture is optimal: 15% RCA, 40% RFBA, 10% GP and a water-cement ratio – 0.48. Concrete samples from this composition show the 28-day cube compressive strength at 39.2 MPa, the axial compressive strength at 29.8 MPa and splitting tensile strength at 2.72 MPa. These indicators almost meet the design requirements for concrete of class C30/35, only the axial compressive strength instead of the minimum value of 30 MPa has an indicator of 29.8 MPa. Microscopic analysis showed that the C-(A)-S-H gels formed by GP and RFBA reduced the total porosity by approximately 18% and increased the proportion of harmless pores (<20 nm) to 25...28%, which contributed to the improvement of the pore structure. This concrete composition allows for a 10% reduction in cement usage and approximately 50-60% reduction in natural aggregate consumption compared to traditional C30/35 concrete, which directly reduces the risks of land occupation and environmental pollution associated with landfilling.

A research group of scientists in their studies [21–22] evaluated the feasibility of using recycled glass as a substitute for natural aggregate in concrete mixtures for 3D printing. In both studies, concrete mixtures with recycled glass aggregate demonstrated higher plasticity indices of concrete mixtures compared to traditional mixtures, improving their rheological properties. This is one of the most important characteristics of mixtures used in 3D printing technology, because most modern construction 3D printers usually use the extrusion method, which requires high mobility of the mixtures. However, the mechanical properties of concretes based on recycled glass material were lower compared to concrete based on river sand.

Karla Cuevas et al. in their work [21], in addition to concrete mixtures of heavy concretes for 3D printing, also studied concrete mixtures of light concretes for 3D printing. Lightweight concretes were prepared with 50 and 100% recycled glass aggregate as a substitute for basalt aggregate and with expanded thermoplastic microspheres (ETM) as a pore former. An effective balance between mechanical characteristics and optimal formation of the microstructure of concretes was achieved in lightweight mixtures with the addition of 50% recycled glass and the introduction of ETM. Thus, the results of the research indicate that recycled glass is a more effective substitute for natural aggregates in mixtures for lightweight concretes used for 3D printing of buildings.

Another relevant case is the use of recycled glass as a finishing material to give architectural expressiveness to the premises of buildings. This means the use of recycled glass in interior and exterior products in which cullet can perform two functions – aesthetic (design element due to color, texture, and texture of products) and functional (insulating material or filler) [3]. Such products include facing panels, facade decorative panels, some types of tiles and mosaics, etc.

It is worth mentioning that in European countries and the USA, the use of colored glass cullet in the production of mosaics and decorative facade panels, as well as some exterior and interior elements, is popular. As in other cases, there are both advantages and disadvantages of using cullet for decorative purposes. From a scientific point of view, the advantages include the following: aesthetics (color range, glare, texture, the ability to create mosaics, etc.), physical properties of products – moisture resistance, frost resistance, strength, etc., reduced use of primary raw materials and recycling of glass waste. Problematic issues include: the need to control the quality and purity of cullet (removal of paints, organic impurities), in some cases, increased production costs, insufficiently developed collection infrastructure and logistics, etc.

Canadian-French scientists in their study [23] examined the design and optimization of a network for collecting, sorting and recycling glass waste within a closed supply cycle. The example is a circular network for recycling glass waste, which includes the option of recovering value by crushing and grinding glass, in order to obtain a pozzolanic material that is used as a substitute for the cement fraction in concrete. The authors developed the first integrated mathematical model of a reverse supply chain for cullet, which allows maximizing profits, minimizing CO₂ emissions, optimally choosing the locations and sizes of processing facilities, and evaluating different options for reuse and recycling. The model was tested on real data from a waste processing enterprise in the Canadian province of Nova Scotia, on the basis of which practical recommendations were made for promoting sustainable glass recycling practices. According to the results of the scientists, the key influence on the profitability of the system is the optimization of the location and size of glass processing facilities.

Thus, world practice proves that recycled glass can be successfully integrated into various segments of construction – from the production of materials for roads and foundations to the production of interior and facade finishing products. This confirms its versatility and competitiveness as a construction resource. The developed collection infrastructure and established glass processing lines in the countries of Europe and North America are an example of the large-scale implementation of such technologies.

We also note that the prospects of this case are noted by foreign experts. Thus, in the study of Oseng-Rees et al. [3], recycled glass plates were tested in outdoor conditions of bathrooms and kitchens. The material was tested in conditions of high humidity and impacts. At the same time, a significant number of samples remained without visible damage.

One of the significant ecological problems of our country is the accumulation of glass waste. They constitute a significant part of solid household waste, but a small amount of them is sent for recycling. Thus, according to researches of Ukrainian scientists, most glass material ends up in landfills after use, and the underdeveloped system of collection, sorting and logistics does not allow to implement in full the potential of glass recycling.

Even before the start of the full-scale war in Ukraine, several enterprises specialized in collecting and processing recycled glass operated. In particular, the company "Utilita" in Novomoskovsk is implementing a closed cycle of cullet production, namely, it is engaged in collecting, sorting and cleaning cullet using modern European equipment and supplying it directly to glass factories [24], WeDoRe is engaged in a full cycle of processing glass, aluminum and all types of polymers, demonstrating the possibility of transforming waste into a clean semi-finished product that can be used on a par with primary raw materials for further production [25].

The full-scale war had serious consequences in this area – on the one hand, the amount of glass waste has increased, which is associated with a large number of building destructions, and on the other hand, there was a loss of capacity, logistics and investments in specialized companies. Today, the main problems are the lack of collection and sorting infrastructure, insufficient investment in the establishment of the recycling process, and underdeveloped logistics [26].

In Ukraine, the issue of glass recycling for construction purposes is gradually gaining momentum [27, 28], especially in the context of the development of the "green economy" and the

increase in the cost of energy sources. The main directions are the production of thermal insulation materials, use in cement concrete and the creation of decorative solutions. Ukraine is among the countries that have their own production of foam glass (Lviv and Dnipro regions), cement and concrete mixtures with the addition of cullet and decorative materials.

Conclusions. The analysis of practical cases of using recycled glass as a raw material for construction materials and products confirmed the economic and environmental feasibility of these technologies. Analysis of world practices showed that the use of cullet in the production of asphalt concrete, concrete mixtures, thermal insulation materials and finishing products, provided that effective technological lines are established, can improve the physical and operational characteristics of these construction materials.

It has been established that there are a number of enterprises operating in our country that use recycled glass to produce various materials, but this number and capacity remain insufficient. Among the reasons are the lack of effective infrastructure for collecting and sorting glass, logistics, a shortage of technological capacities, and the lack of state incentives for the interest of enterprise representatives.

To implement the world experience of using recycled glass for the production of building materials in Ukraine, it is necessary to actualize the following steps:

1. Improve the regulatory framework, namely, to initiate amendments and development of a number of state building codes (SBK) and harmonize them with the requirements of the European Committee for Standardization regarding the use of secondary raw materials in construction.

Ukraine has a general framework for waste management, in particular the Law of Ukraine "On Waste Management", which came into force in 2023, however, for the effective launch of glass waste recycling a number of specialized regulatory documents and technical regulations are not enough. Firstly, it is worth developing a national standard for recycled glass as a construction material, which would clearly define the classification of recycled glass, requirements for its quality (purity, granulometric composition, pozzolanic activity, etc.). Secondly, another effective mechanism is to establish mandatory norms at the legal level regarding the use of a minimum share of recycled mineral raw materials for the production of construction materials, which are implemented in many countries of the European Union. The possibility of using waste, including recycled glass, is complicated due to the lack of clear criteria between the waste status and the status of construction materials, since waste is subject to a more extensive permitting procedure because of their potential danger to human health. All of this is a significant barrier for large-scale glass recycling in the construction industry.

2. Introduce economic incentives by establishing tax exemptions for producers of construction materials based on recycling mineral raw materials and establishing priority in public procurement for materials containing such raw materials.

3. Create regional infrastructures for collecting, sorting and processing recycled glass. Develop the network of regional centers for collecting, sorting and processing glass within large agglomerations (Kyiv, Dnipro, Odesa, Kharkiv, Lviv) by purchasing modern equipment under the terms of public-private partnership or by involving international investments.

4. Conduct social and informational events. Currently, there is low awareness of the general public about the benefits of separate waste collection and technologically correct solutions for their rational processing, the possibilities and advantages of recycling. Most people consider this idea unattainable in implementation, so it is worth conducting information campaigns with the demonstration and popularization of successful global cases of glass collection, sorting and recycling systems.

In addition, there is a shortage of qualified personnel at both the engineering and labor levels to provide consultations, recommendations, and direct implementation of recycling technologies. The solution of this problem could be the introduction by the Ministry of Education and Science of pilot projects with the opening of centers for sorting and recycling of recycled glass based on specialized universities. Following the example of how energy efficiency centers were opened in several universities of Ukraine. The functioning of such centers will allow to solve several issues at once: the availability of demonstration stands and exhibitions on the usefulness of sorting and recycling of glass; training of specialists in ecology, civil engineering specialties on visual equipment; conducting consultations for communities and scientific research.

5. Taking into account the needs of post-war reconstruction of Ukraine, the highest priority is to establish the production of thermal insulation materials (foam glass) to increase the energy efficiency of buildings; the development of concrete mixtures based on recycled glass for 3D printing

of building structures as an alternative rapid technology for the restoration of destroyed buildings and the development of materials based on recycled glass for road construction.

The implementation of technologies for the use of recycled glass in the production of construction materials in Ukraine is particularly important in view of the European integration movement and the need for transition of the national economy sectors to the principles of a circular economy.

This research was conducted with the support of the International Visegrad Fund under the Visegrad Scholarship Programme (Scholarship ID: 52510425) at the Maria Curie-Skłodowska University in Lublin.

References

- [1] D.D. Furszyfer Del Rio, B.K. Sovacool, A.M. Foley, S. Griffiths, M. Bazilian, J. Kim, D. Rooney, "Decarbonizing the glass industry: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111885>
- [2] A. Lakhout, "Enhancing environmental benefits through recycling glass to improve soil properties and concrete", *Cleaner Waste Systems*, 11, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100301>
- [3] T.E. Oseng-Rees, A.J. Clayton, N.R. Haigh, D.J. Coathup, J.J. Tomes, "Environmental and impact testing of post-consumer fused recycled glass tiles for architectural applications", *Glass Structures & Engineering*, 10, 15, 2025. <https://doi.org/10.1007/s40940-025-00300-8>
- [4] G. Gengan, H. Kew, P. Konstantinos, "Effect of recycled glass aggregates on mechanical and physical properties of structural concrete", *Theory and Building Practice*, vol. 5, no 1, pp. 102 – 111, 2023.
- [5] S. Güleğül, F. Kar, "Evaluation of the expanded glass as a light concrete aggregate", *Innovative Infrastructure Solutions*, 7, 149, 2022. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00738-z>
- [6] S. Kalampokis, D. Kalama, F. Kesikidou., M. Stefanidou, E. Manthos, "Assessment of Waste Glass Incorporation in Asphalt Concrete for Surface Layer Construction", *Materials*, 16, 14, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16144938>
- [7] H. Hamada, A. Alattar, B. Tayeh, F. Yahaya, B. Thomas, "Effect of recycled waste glass on the properties of high-performance concrete: A critical review", *Case Studies in Construction Materials*, 17, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01149>
- [8] I.V. Zaiukov, O.V. Kobylanskyi, "Pererobka vidkhodiv skla yak faktor ekolohichnoi bezpeky Ukrainy", *Yakist i bezpeka suchasni realii: materialy naukovo-praktychnoi konferentsii*, Vinnytsia : VNTU, 2018. pp. 135 – 137.
- [9] I.A. Kolodiichuk, "Tekhniko-tekhnologichniy potentsial utylizatsii vidkhodiv u rehionakh Ukrainy", *Sotsialno-ekonomichni problemy suchasnoho periodu Ukrainy*, 3(161), pp. 34 – 40, 2023. <https://doi.org/10.36818/2071-4653-2023-3-5>
- [10] N.A. Antoniuk, V.R. Kostiuk, "Retsyklinh budivelnykh vidkhodiv pid chas viiny v Ukraini", *Actual Problems of Economics*, 7 (277), pp. 130–142, 2024. <https://doi.org/10.32752/1993-6788-2024-1-277-130-142>
- [11] G.H. Shafabakhsh, Y. Sajed, "Investigation of dynamic behavior of hot mix asphalt containing waste materials; case study: Glass cullet", *Case Studies in Construction Materials*, 1, 96 – 103, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2014.05.002>
- [12] Recycled glass road-surfacing given seal of approval. Portal *Let's Recycle*. [Online]. Available: <https://www.letsrecycle.com/news/recycled-glass-road-surfacing-given-seal-of-approval/>. Accessed on: October 15, 2025.
- [13] A. Doukani, H. Bekki, L. Hariche, "Grain Size Correction of Pavement Unbound Granular Material Using Recycled Glass Aggregate", *KSCE Journal of Civil Engineering*. 28 (2), 609 – 616, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-2255-6>
- [14] P. Punetha, S. Nimbalkar, "Utilisation of construction and demolition waste and recycled glass for sustainable flexible pavements: A critical review", *Transportation Geotechnics*. 54, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101612>
- [15] I. Horonko, P. Tihomirovs, A. Korjakins, "Study of Properties and Characteristics of a

- Foam Glass from a Mixture of Glass Shards and Perlite", *Materials*, 18 (18), 2025. <https://doi.org/10.3390/ma18184422>
- [16] MISAPOR – Innovation aus Tradition. Portal Misapor. [Online]. Available: <https://www.misapor.ch/ueber-uns/>. Accessed on: October 15, 2025.
- [17] Glapor thermal insulation made of cellular glass. Portal GLAPOR. [Online]. Available: <https://www.glapor.de/en>. Accessed on: October 15, 2025.
- [18] L.R. Rana, K.S. Ahmed, S.I. Ahmad, "Effect of waste glass on fresh and strength properties of recycled brick aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, 500, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144185>
- [19] S. Ahmad, S. Upadhyay, A. Umar, M.A. Al-Osta, "Effect of recycled crushed glass and recycled coarse aggregate on the properties of self-compacting concrete", *Case Studies in Construction Materials*, 19, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02532>
- [20] Yi Zhao, Yo. Guo, Yu. Sun, X. Zhou, Zh. Min, Qi. Lin, S. Chen, Yu Li, M. Jiang, A. Feng, Sh. Kang, "Mechanical and microstructural properties of glass powder-modified recycled brick-concrete aggregate concrete", *Case Studies in Construction Materials*, 22, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04720>
- [21] K. Cuevas, S.-Ye. Chung, P. Sikora, D. Stephan, "Performance of normal-weight and lightweight 3D printed cementitious composites with recycled glass: Sorption and microstructural perspective", *Journal of Building Engineering*, 97, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110880>
- [22] G.H.A. Ting, Yi W.D. Tay, Ye Qian, M.J Tan, "Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21 (4), 2019. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00857-x>
- [23] F. Ashouri, C. Diallo, H.E. Naggar, U. Venkatadri, A. Khatib, "Design and Optimization of a Waste Glass Recycling Network", *IFAC Papers On Line*, volume 59, issue 10, pp. 667 – 672, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.09.114>
- [24] UTYLITA. National resources. Portal Utylita. [Online]. Available: <https://www.stekloboy.com/>. Accessed on: October 20, 2025.
- [25] Ukrainian company for recycling secondary raw materials. Portal WeDoRe. Recycling company. [Online]. Available: <https://www.wedore.com.ua/#about>. Accessed on: October 20, 2025.
- [26] N.M. Samoilenko, V.D. Katenin, A.O. Sakun, Vykorystannia u budivelnii sferi vidkhodiv viiny, shcho mistiat sklo. [Online]. Available: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/b183b626-30a5-41e0-afe0-51a31e3b8ff9/content>. Accessed on: October 15, 2025.
- [27] V.M. Bakulina, I.Yu. Shcherbyna, "Osoblyvosti tekhnologii vyrobnytstva pinoskla v Ukraini", *Ahroinzheneriia: suchasni problemy ta perspektyvy rozvytku: zbirnyk tez dopovidei II mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, Kyiv : NUBiP Ukrainy, 2019, pp. 231 – 233.
- [28] V.D. Bondar, N.V. Yareshchenko, "Pererobka sklianykh vidkhodiv dlia dorozhnoho budivnytstva", *Sektsiia budivnytstvo ta ekspluatatsiia avtomobilnykh dorih: zbirnyk naukovykh prats 86-yi mizhnarodnoi naukovo konferentsii studentiv universytetu*, Kharkiv: KhNADU, 2024. pp. 32 – 35. https://rcf.khadi.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/Zbirmik_conf_stud_2024.pdf

ПРАКТИЧНІ КЕЙСИ РЕЦИКЛІНГУ ВТОРИННОГО СКЛА У БУДІВНИЦТВІ

¹Єлісеєва М.О., к.т.н.,

Yeliseieva.M.O@nmu.one, ORCID: 0009-0002-7112-9904

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
пр. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна

²Шило О.М.,

shilo2040@gmail.com, ORCID: 0009-0005-7967-1468

²Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького
вул. Наукового містечка, 59, м. Запоріжжя, 69000, Україна

Анотація. Для України питання управління й переробки відходів залишається однією з

найгостріших екологічних проблем. Достатньо значну частку у загальній масі твердих побутових відходів належить саме скляним відходам. При цьому скло практично не розкладається у природних умовах, що створює тривале навантаження на довкілля. Водночас воно має потенціал перспективного сировинного матеріалу, яке може повторно перероблятися без втрати основних фізико-хімічних властивостей. У зв'язку з цим актуальним є питання рециклінгу вторинного скла, особливо у будівельній галузі, яка є головним споживачем природних ресурсів (біля 50 %) і тому, відповідно, потребує запровадження технологій із використанням альтернативних варіантів сировини.

Це сприятиме зниженню екологічного навантаження, раціональному використанню ресурсів і підвищенню економічної ефективності будівництва. Метою роботи є визначення ефективності й можливості імплементації до сучасних умов України успішних світових практик використання вторинного скла для виробництва будівельних матеріалів.

Аналіз наукових робіт дозволив виявити найбільш успішні кейси рециклінгу скла для виробництва будівельних матеріалів у світовій практиці. Виготовлення асфальтобетонних сумішей із додаванням 10 – 30% склобою (glasphalt), теплоізоляційних матеріалів на основі піноскла, легких бетонів із мікроподрібненим склом як частковим заміником піску та оздоблювальних матеріалів, таких як декоративні панелі і мозаїки із кольорової склокрихти. В Україні, попри наявність виробничих потужностей, рівень повторного використання скла залишається низьким через нерозвинену інфраструктуру збирання, сортування та очищення скляних відходів. Проте зростання потреб у будівельних матеріалах у процесі післявоєнного відновлення створює сприятливі умови для масштабування таких технологій.

Для імплементації світового досвіду використання вторинного скла для виробництва будівельних матеріалів в Україні необхідно реалізувати наступні кроки:

1. Покращити нормативно-правову базу, а саме ініціювати внесення змін та розробку низки державних будівельних норм (ДБН) та гармонізувати їх із вимогами European Committee for Standardization щодо використання вторинної сировини у будівництві.

2. Запровадити економічні стимули шляхом встановлення податкових пільг для виробників будівельних матеріалів на основі вторинної мінеральної сировини та встановлення пріоритету у публічних закупівлях на матеріали із вмістом такої сировини.

3. Створити регіональну інфраструктуру збирання, сортування та переробки вторинного скла.

4. Проводити соціально-інформаційні заходи.

5. Враховуючи потреби повоєнної відбудови України найбільш пріоритетним є налагодження виробництва теплоізоляційних матеріалів (піноскла) для підвищення енергоефективності будівель; розробка бетонних сумішей на основі вторинного скла для 3D-друку будівельних конструкцій як альтернативної швидкої технології із відновленню зруйнованих будівель та розробка матеріалів на основі вторинного скла для дорожнього будівництва.

Ключові слова: вторинне скло, склобій, рециклінг, будівельні матеріали, «зелене» будівництво.

Стаття надійшла до редакції 5.12.2025

Стаття прийнята до друку 27.02.2026

Дата публікації статті 20.03.2026

[This work](#) © 2026 by [Yelisieieva M.O., Shylo O.M.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

REGULATION OF THE WATER DEMAND OF MORTAR MIXES FOR CELLULAR CONCRETES BY PLASTICIZERS AND MECHANO-CHEMICAL ACTIVATION

¹**Martynov V.I.**, Doctor of Engineering, Professor,
ogasa_psk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9674-7920

¹**Taichan D.S.**, postgraduate student,
dimataichan1996@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1603-323X

¹*Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
4 Diedrikhson Street, Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. The study investigates the influence of plasticizing admixtures of different chemical nature and the mechanical-chemical activation of components on the water demand and rheological properties of the mortar mixture for non-autoclaved cellular concrete. It is established that increasing the dosage of the plasticizer reduces water demand and enhances the mixture's mobility, ensuring stable gas formation and the development of a uniform pore structure, which is critically important for thermal-insulating materials. It has been demonstrated that polycarboxylate super plasticizers exhibit a more pronounced dispersing effect compared to naphthalene-formaldehyde admixtures, as they create combined steric and electrostatic barriers on the surface of cement particles, preventing their aggregation. The application of mechanical-chemical activation of the cement-ash system increases its fineness, activates particle surfaces, and accelerates early hydration processes, which leads to an increase in the spread diameter of the mixture without additional water demand, even at minimal admixture dosages. Optimal activation duration has been identified, at which the maximum rheological effect is achieved. Excessive activation time, in contrast, results in over-grinding, an increase in specific surface area, higher water demand, and potential deterioration of structural stability. Iso-surface analysis of the system "plasticizer dosage – activation duration – flow spread" confirmed the synergistic interaction of these parameters: the greatest increase in mobility occurs when a moderate amount of plasticizer is combined with a rational activation duration, ensuring an optimal balance between workability and mixture stability. The obtained results enable a more precise optimization of the mix design and technological regime for producing cellular concrete, improving mixture workability, structural uniformity, and the operational performance of the final material.

Keywords: cellular concrete, plasticizing admixtures, polycarboxylate super plasticizers, mechanical-chemical activation, water demand, mixture workability, iso-surfaces, composition optimization.

Introduction. One of the most significant directions in contemporary construction materials science is the improvement of thermal insulation cellular concretes. A decisive stage in the production of cellular concrete is the formation of its porous structure and the geometric parameters of inter-pore partitions, which largely determine the physical, mechanical, and thermal performance of the final material.

At the stage of primary structure formation, the system exhibits an inherent contradiction between two opposing phases: on the one hand, the air bubble forming the future pores, and on the other hand, the cementitious mortar matrix. The mortar phase represents a highly concentrated suspension consisting of liquid and solid particles. Within such a medium, the air bubble, due to its low density and mass, exists under mechanically unstable conditions. The degree of this instability is primarily governed by the rheological characteristics of the mortar phase.

In modern cellular concrete technology, particular attention is therefore devoted to the controlled regulation of the rheological properties of mortar mixtures, which ensure structural stability during pore formation, shaping, and early hardening. The rheological behavior of the mixture is determined by a complex combination of factors, including binder composition, type and dosage

of plasticizing admixtures, water-to-cement ratio (W/C), mixing intensity, and physicochemical activation of the components.

The rheological properties of mortar mixtures can be effectively regulated through control of water demand. Water demand is a key technological parameter that determines not only mixture workability but also density, porosity, structural uniformity, and ultimately the physical and mechanical properties of the hardened material. Excessive water content leads to reduced strength, segregation, and instability of the pore structure, whereas insufficient water complicates foaming processes and hinders uniform distribution of gas-forming components.

Analysis of Recent Research and Publications. The rheological characteristics of cement and cellular systems play a critical role in ensuring structural uniformity, optimal porosity, and stability during pore formation. Numerous studies [1–3] emphasize that the ability of a mixture to maintain plasticity, stability, and controlled gas formation without segregation constitutes a fundamental prerequisite for obtaining high-quality cellular concrete.

The workability and water demand of cement-based systems depend on interactions between binder particles, the surface properties of water, and the presence of organic and inorganic admixtures. According to previous studies [4, 5], an increase in binder dispersity or the introduction of active mineral additives modifies the specific surface area of the system, directly affecting the amount of adsorbed water and the kinetics of hydration processes.

Several researchers [5–7] have demonstrated that increased cement fineness or the incorporation of finely ground mineral additives (silica fume, fly ash, metakaolin) reduces water demand due to densification of the granular structure. The use of plasticizing and super plasticizing admixtures of various chemical types (naphthalene sulfonates, lignosulfonates, polycarboxylates) enables a reduction in the water-to-cement ratio by 10–25% without compromising mixture workability [8, 9].

The influence of plasticizing admixtures on the rheology of cement pastes has been extensively investigated. As reported by Ramachandran [6] and Rixom & Mailvaganam [7], lignosulfonate and naphthalene sulfonate admixtures reduce water demand by approximately 10–15%, whereas modern polycarboxylate-based super-plasticizers provide a more pronounced effect due to the steric repulsion mechanism between cement particles.

Experimental evidence indicates that optimal plasticizer dosage improves particle wettability, reduces the amount of bound water, and enhances the homogeneity of the cellular concrete structure. Excessive dosages, however, may result in excessive dilution of the mixture and loss of foam stability [8–10].

A significant approach to improving the technological properties of cement systems is mechanical-chemical activation. According to previous investigations, preliminary grinding of cement in high-energy mills alters particle morphology and creates active defects within the crystal lattice. This promotes intensified hydration, improved adsorption capacity, and, consequently, reduced water demand [11, 12]. It has been emphasized that the combination of mechanical activation with super plasticizer application produces a synergistic effect, enabling a reduction of the water-to-cement ratio to 0.25–0.30 while maintaining high workability. This is particularly important for cellular concretes, as excessive water content leads to reduced stability of the gas-foam structure and the formation of macropores [13, 14].

The rheological behavior of cellular systems differs fundamentally from that of conventional cement pastes due to the presence of pore-forming agents and stabilizers. Even minor variations in component ratios, viscosity, or surface activity of the liquid phase can significantly affect pore distribution, density, and strength of the final material [13–15].

Moreover, cellular cement systems exhibit complex nonlinear rheological behavior. Cement-foam mixtures demonstrate pseudoplastic characteristics, in which viscosity decreases with increasing shear rate. This implies that even slight changes in mixture composition or mixing energy may result in substantial variations in structure formation [15].

Recent studies also indicate that water demand and rheological properties are influenced by:

- content and fineness of quartz sand;
- type and concentration of surfactants;
- duration and intensity of mixing;

- temperature conditions during mixture preparation.

In particular, an increase in temperature above 30 °C accelerates hydration reactions and leads to structural thickening, necessitating additional water to maintain the required level of workability [16].

The analysis of the available literature indicates that a complex set of interrelated compositional and technological factors simultaneously affects the water demand of cellular concrete mortar mixtures. However, the interactions between these factors and their quantitative evaluation remain insufficiently studied, which determines the relevance and scientific significance of the present research.

Research Objective. The objective of this study is to determine the influence of plasticizing admixtures and mechanical-chemical activation on the water demand of mortar mixtures for cellular concrete.

Research Tasks. 1. To substantiate the selection of an appropriate type of plasticizer for the production of thermal insulation cellular concrete. 2. To conduct an experimental study using methods of mathematical statistics to evaluate the influence of various factors on the water demand of cellular concrete mortar mixtures.

Materials and Methods. The research was based on a systems approach, combining experimental investigations with statistical processing of results to determine the effects of individual and combined factors. Portland cement M-500 with a specific surface area of 320–340 m²/kg was used. The cement was characterized by stable hardening behavior and a low impurity content, which minimized result variability. Fly ash from thermal power plants was used as an active mineral additive, providing pozzolanic reactivity and reducing water demand through micro-filling of the intergranular space.

Chemical modification of the system was achieved using plasticizing admixtures: a naphthalene sulfonate plasticizer at dosages of 0.5–2.0% by cement mass and a polycarboxylate-based super plasticizer at dosages of 0.25–1.5%. Mortar mixtures were prepared by first dissolving the admixtures in mixing water, followed by the introduction of solid components and subsequent mixing. The flow spread diameter was determined using a Suttard viscometer. After the initial measurement, the mixture was subjected to mechanical-chemical activation for 30, 60, and 90 s in a laboratory rotor mixer providing intensive mixing and enhanced system homogeneity. After activation, the flow spread diameter was measured again.

The experimental program was conducted in two stages. During the first stage, the influence of two plasticizing admixtures of different chemical nature on the rheological properties and flow spread of cellular concrete mortar mixtures was evaluated. A second-generation naphthalene sulfonate super plasticizer acting via electrostatic dispersion of cement particles was selected for comparison. This admixture improves material density and strength, particularly at early stages of hardening, but may cause mixture segregation and structural non-uniformity when overdosed. A third-generation polycarboxylate super plasticizer acts through steric hindrance created by branched polymer chains, promoting uniform dispersion, structural stability, and improved physical and mechanical properties at relatively low dosages.

To address the second research task, a mathematical experiment design method was applied using a three-factor Box–Behnken design (type B-3). The selected variable factors were:

- X₁ – filler content (ground quartz sand): 0, 0.2, 0.4;
- X₂ – plasticizer dosage (naphthalene sulfonate): 0.5%, 1.0%, 1.5%;
- X₃ – duration of mechanical-chemical activation, s: 30, 60, 90.

Each factor was varied at three levels (minimum, central, and maximum), enabling the construction of a response surface model and assessment of factor interactions. The mixture preparation involved preliminary dry mixing of cement and ground quartz sand, followed by the addition of the plasticizer solution prepared in a portion of the mixing water. Subsequent mechanical-chemical activation was performed in a laboratory mixer for a duration corresponding to factor X₃. The flow spread diameter was measured before and after activation, and the increment in flow spread was calculated as a quantitative indicator of the effect of mechanical-chemical activation.

Research results. Figure 1 illustrates the influence of plasticizer dosage at different water-to-cement ratios (W/C = 0.30–0.45) on the flow spread of the mixture. Based on the experimental data, clear regularities in the effect of plasticizing admixtures on mixture mobility were established.

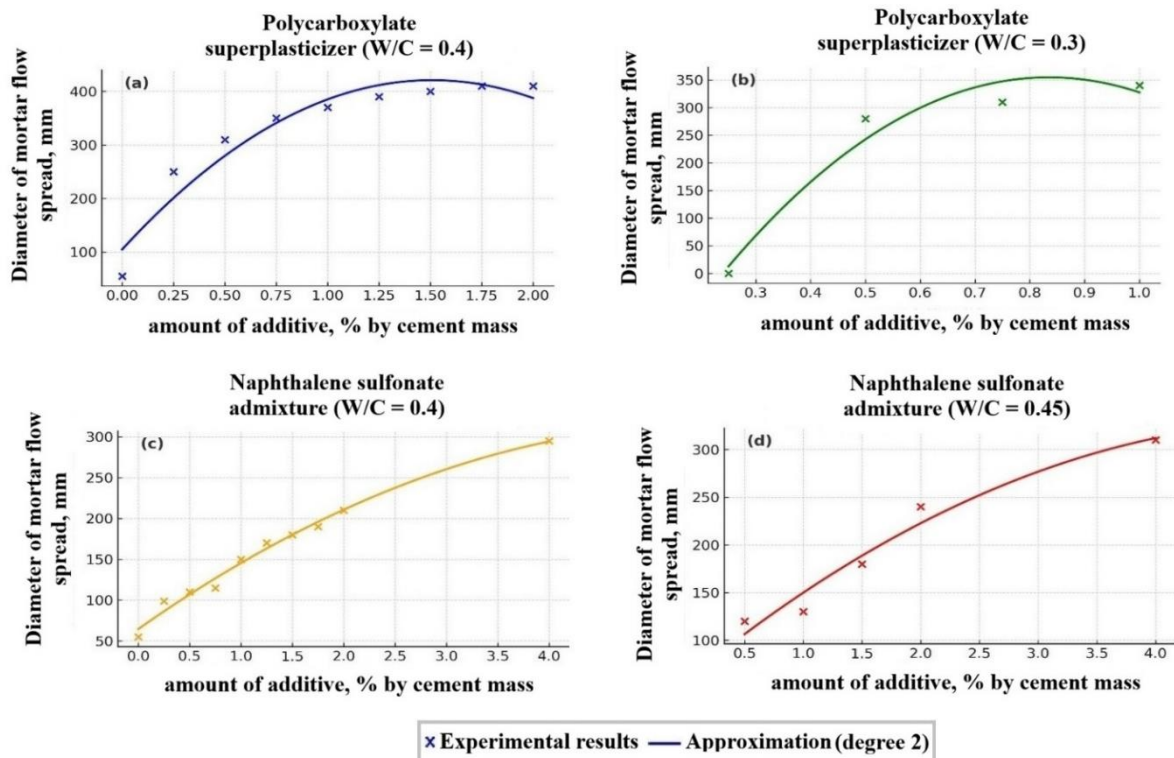


Fig. 1. Dependence relationship between the flow spread diameter and plasticizer dosage at different water-to-cement ratios obtained by polynomial approximation

Table 2 presents the results of the influence of variable factors on the flow spread diameter of the mortar mixture before and after activation, as well as the calculated increment in flow spread diameter, which characterizes the change in mixture workability induced by activation. The increment in flow spread diameter was adopted as a quantitative criterion for evaluating the effectiveness of the combined action of the plasticizer, mineral filler, and mechanical-chemical activation.

Table 2 – Planning matrix experiment and results

Run No.	Factors			Results		
	X ₁	X ₂	X ₃	Flow spread diameter of the mortar mixture before activation, mm	Flow spread diameter of the mortar mixture after activation, mm	Increment in flow spread diameter, mm (absolute)
1	-	-	-	50	160	110.0
2	+	-	-	90	215	125.0
3	-	+	-	70	225	155.0
4	+	+	-	255	300	45.0
5	-	-	+	120	220	100.0
6	+	-	+	195	340	145.0
7	-	+	+	155	250	95.0
8	+	+	+	245	380	135.0
9	-	0	0	165	230	65.0
10	+	0	0	220	320	100.0
11	0	-	0	155	285	130.0
12	0	+	0	185	340	155.0
13	0	0	-	165	270	105.0
14	0	0	+	185	320	130.0
15	0	0	0	210	270	60.0

Based on the experimental results, regression coefficients were determined and mathematical models describing the flow spread diameter of the mortar mixture before activation, after activation, and its variation induced by activation were developed. Due to the complex nonlinear nature of the observed relationships, logarithmic transformation was applied to obtain mathematical models that adequately describe the experimental data. The resulting logarithmic models of the response variables are expressed as follows:

1. Before activation $LnD = 5.347 + 0.311x_1 + 0.204x_2 + 0.252x_3 + 0.085x_1x_2 - 0.117x_1x_3 - 0.112x_2x_3 - 0.097x_1^2 - 0.215x_2^2 - 0.184x_3^2$

2. After activation $LnD = 5.705 + 0.177x_1 + 0.109x_2 + 0.129x_3 - 0.003x_1x_2 - 0.117x_1x_3 - 0.054x_2x_3 - 0.128x_1^2 - 0.009x_2^2 - 0.048x_3^2$

3. Increment $LnD = 4.535 + 0.004x_1 - 0.063x_2 + 0.088x_3 - 0.173x_1x_2 + 0.229x_1x_3 - 0.069x_2x_3 - 0.256x_1^2 + 0.310x_2^2 + 0.115x_3^2$

All developed models were found to be adequate within a 5% experimental error. This made it possible to construct various graphical representations illustrating the influence of the variable factors on the water demand of the mortar mixture. Figure 2 presents a graphical interpretation of the experimental results. The combined three-dimensional plot illustrates the variation in the flow spread diameter of the mortar mixture before and after mechanical-chemical activation, as well as the increment of this parameter. This visualization enables a direct comparison of changes in mixture workability induced by mechanical-chemical activation under different combinations of filler content and plasticizer dosage.

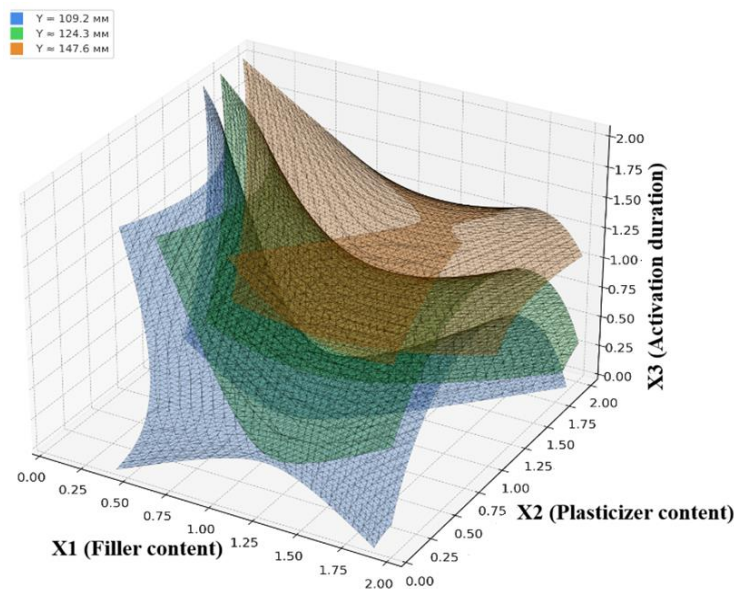


Fig. 2. Iso-surfaces of the flow spread increment resulting from mechanical-chemical activation

Results and Discussion. The obtained experimental results confirm a significant influence of both plasticizing admixtures and mechanical-chemical activation on the rheological properties of the mortar mixture. It was established that changes in mixture workability exhibit a pronounced nonlinear dependence on plasticizer dosage and activation duration.

Effect of the Type of Plasticizing Admixture. Figure 1 illustrates the dependence of the flow spread diameter of the mortar mixture on the dosage of plasticizing admixtures of different chemical nature at various water-to-cement ratios ($W/C = 0.30-0.45$). As can be observed from the experimental data, an increase in plasticizer dosage in all cases leads to an increase in mixture workability, which is associated with enhanced dispersion of cement particles and a reduction in inter-particle coagulation. At the same time, the shape of the curves differs substantially depending on the chemical nature of the admixture.

For polycarboxylate-based super plasticizers (Fig. 1a, b), a pronounced parabolic relationship is observed. As the admixture dosage increases to 1.0–1.5% by cement mass, the flow spread diameter

increases rapidly, followed by a saturation effect. This behavior corresponds to the mechanism of action of polycarboxylates, which provide both electrostatic repulsion and steric stabilization of cement particles due to the presence of polymer side chains. The efficiency of the plasticizing effect increases with decreasing W/C, which is attributed to the higher particle concentration in the system and more intensive polymer adsorption on particle surfaces.

In contrast, naphthalene-formaldehyde-based admixtures (Fig. 1c, d) are characterized by an almost linear or sub-linear increase in flow spread without a clearly expressed saturation effect. Maximum workability values are achieved at dosages of 2.5–3.5%, which is mainly explained by the predominantly electrostatic mechanism of action of these admixtures. With increasing water-to-cement ratio, the efficiency of naphthalene-formaldehyde plasticizers decreases, since a higher amount of free water reduces the density of inter-particle contacts.

Thus, the experimental results confirm that polycarboxylate super plasticizers are more effective at low W/C ratios and provide a greater increase in mixture flow spread at lower dosages, whereas conventional naphthalene sulfonates exhibit a more linear but less pronounced effect. Polynomial approximation of different orders adequately describes the obtained experimental relationships and can be used for further quantitative assessment of the influence of plasticizers on the water demand of cement systems.

Analysis of the obtained dependencies indicates that the effectiveness of plasticizing admixtures strongly depends on both their chemical nature and the water-to-cement ratio of the system. Polycarboxylate super plasticizers ensure a significantly higher increase in workability due to the combined electrostatic and steric mechanisms, while naphthalene-formaldehyde admixtures demonstrate a gradual but less intensive effect. As the W/C ratio decreases, the sensitivity of the system to the action of plasticizers increases, opening opportunities for optimizing mortar compositions in order to reduce water demand while maintaining high technological performance.

Effect of Mechanical-Chemical Activation. Figure 2 presents iso-surfaces illustrating the influence of the main factors—filler content (X_1), plasticizer dosage (X_2), and duration of mechanical-chemical activation (X_3) – on the increment in the flow spread diameter of the mortar mixture. The iso-surfaces represent the spatial distribution of the response variable Y , which characterizes changes in mixture workability resulting from the combined action of these factors. As shown in the figure, the distribution exhibits a pronounced nonlinear character, indicating a complex interaction between the components of the system.

The most significant influence on flow spread is exerted by plasticizer dosage. As its content increases, the flow spread increases; however, beyond a certain level, a saturation effect is observed, where further increases in dosage do not lead to a substantial improvement. This behavior is explained by the attainment of a limiting surface adsorption of polymer molecules on cement particles, after which the system reaches a stabilized state.

The duration of mechanical-chemical activation (X_3) exhibits a dual effect. At relatively short activation times (up to 60 s), the surface of cement grains is activated and the degree of system dispersion increases, which has a positive effect on flow spread. With increasing activation duration, however, the effect becomes adverse: excessive grinding of particles occurs, leading to an increase in specific surface area and water demand, which reduces the overall workability of the mixture. Thus, this factor is characterized by the presence of a clearly defined optimum.

The influence of mineral filler content (X_1) is manifested through changes in system viscosity. At low and moderate concentrations, a slight increase in flow spread may occur due to a reduction in inter-particle friction. However, when the filler content exceeds a certain threshold, mixture workability decreases markedly as a result of plasticizer adsorption on the filler particle surfaces and mechanical densification of the structure.

The shape of the iso-surfaces indicates the presence of significant interactions between the investigated factors. The most pronounced synergistic effect is observed between plasticizer dosage and activation duration, where moderate mechanical-chemical treatment enhances the plasticizing effect and ensures the maximum increment in flow spread diameter. At the same time, excessive combinations of high values of both factors may lead to an opposite effect. Partial compensation of the negative influence

of filler content is also possible through activation, but only within optimal processing regimes.

Overall, the results confirm that mechanical-chemical activation in combination with plasticizing admixtures makes it possible to significantly enhance the workability of cement systems, provided that activation duration and mixture composition are appropriately selected. Polynomial approximation adequately reproduces the nonlinear nature of the observed dependencies and can be applied for predicting optimal technological parameters.

Further analysis of the obtained relationships shows that the effectiveness of mechanical-chemical activation is determined by the combined influence of activation duration, plasticizer dosage, and filler content. The maximum increment in flow spread is achieved at intermediate activation durations and increased plasticizer dosages, where a synergistic interaction between the factors is observed. Excessive activation or excessive filler content reduces mixture workability due to increased water demand and adsorption of plasticizer molecules by solid particles. Thus, an optimal combination of mechanical-chemical activation regime and mixture composition ensures maximum technological efficiency.

Conclusions:

1. The study investigated the regularities governing the influence of plasticizing admixtures of different chemical nature and mechanical-chemical activation on the water demand and workability of mortar mixtures for cellular concrete. It was established that increasing plasticizer dosage within optimal concentration ranges reduces system water demand and increases the flow spread diameter.

2. Polycarboxylate super plasticizers provide a significantly greater effect compared to naphthalene-formaldehyde-based admixtures, which is explained by the combined electrostatic and steric mechanisms of action. Their efficiency increases with decreasing water-to-cement ratio.

3. Mechanical-chemical activation of the cement system positively affects mixture workability by increasing particle dispersity and surface activity. At the same time, excessive activation duration leads to an adverse effect due to increased specific surface area and water demand.

4. A synergistic interaction between plasticizer dosage and mechanical-chemical activation duration was identified. Optimal values of these factors ensure the maximum increment in flow spread diameter without compromising mixture stability.

5. The obtained results make it possible to determine rational component proportions and activation parameters for reducing water demand and improving the technological properties of cellular concretes, which is of practical significance for advancing thermal insulation material technologies.

References

- [1] I.M. Roitman, *Reolohichni vlastyvoli tsementnykh system*. Kyiv: Budivelnyk, 2017.
- [2] A.I. Zaichenko, V.A. Pluhin, *Tekhnolohiia nizdriuvatykh betoniv*. Kharkiv: KhNUBA, 2020.
- [3] V.S. Ramachandran, J.J. Beaudoin, *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. Noyes Publications, 2016.
- [4] M. Collepardi, *Modern Concrete Technology*. Taylor & Francis, 2018.
- [5] A.M. Neville, *Properties of Concrete*. Pearson Education, 2021.
- [6] O. Pashkevich et al., "Effect of superplasticizers on rheology and strength of foam concrete mixtures", *Construction and Building Materials*, vol. 296, pp. 123–131, 2022.
- [7] K.M. Liew et al., "Lightweight foamed concrete: Rheological behavior and performance optimization", *Cement and Concrete Composites*, vol. 118, pp. 103–112, 2021.
- [8] R.Z. Rakhimov et al., "Mechanochemical activation of Portland cement: Effects on hydration and structure formation", *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, pp. 178–183, 2020.
- [9] P.V. Kryvenko, O.A. Petropavlovskiyi, "Scientific principles of low-density concrete technology", *Building Materials and Products*, no. 2, pp. 15–22, 2023.
- [10] A.P. Pustovhar et al., "Surface modification of cement grains and water demand reduction", *Cement and Concrete Research*, vol. 132, pp. 106–114, 2020.
- [11] S. Mindess, J.F. Young, *Concrete*. Prentice Hall, 2019.
- [12] I.V. Barabash, *Mekhanokhimichna aktyvatsiia mineralnykh viazhuchykh rehovyn*: Navch. posibnyk. Odesa : Astroprint, 2002.

- [13] A. Korjakins, G. Shakhmenko, "Rheological properties and structure formation of lightweight concrete mixtures", *Procedia Engineering*, vol. 172, pp. 518–525, 2019.
- [14] O.M. Smyrnova, "Influence of surfactants on stability of foam concrete mixtures", *Construction and Building Materials*, vol. 247, pp. 118–126, 2020.
- [15] Y. Zhang et al., "Temperature effects on rheology of cementitious systems containing superplasticizers", *Materials*, vol. 15, no. 3, Art. 842, 2022.
- [16] N. Roussel, *Understanding the Rheology of Concrete*. Woodhead Publishing, 2021.

РЕГУЛЮВАННЯ ВОДОПОТРЕБИ РОЗЧИНОВОЇ СУМІШІ ДЛЯ НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ ПЛАСТИФІКАТОРАМИ ТА МЕХАНО-ХІМІЧНОЮ АКТИВАЦІЄЮ

¹Мартинів В.І., д.т.н., професор,
ogasa_psk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-9674-7920

¹Тайчан Д.С., аспірант,
dimataichan1996@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1603-323X

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

Анотація. У роботі досліджено вплив пластифікуючих добавок різної хімічної природи та механо-хімічної активації компонентів на водопотребу та реологічні властивості розчинової суміші для ніздрюватого бетону. Встановлено, що збільшення дозування пластифікатора сприяє зменшенню водопотреби та підвищенню рухливості суміші, забезпечуючи стабільність газоутворення та формування рівномірної порової структури матеріалу, що є критично важливим для теплоізоляційних виробів. Доведено, що полікарбоксилатні суперпластифікатори проявляють більш виражений диспергувальний ефект порівняно з нафталінформальдегідними добавками, оскільки створюють на поверхні частинок цементу комбіновані стеричні та електростатичні бар'єри, які перешкоджають агрегації. Застосування механо-хімічної активації цементно-зольної системи підвищує її дисперсність, активує поверхню частинок і прискорює ранні стадії гідратації, що забезпечує зростання діаметра розтікання суміші без додаткового приросту водопотреби навіть за мінімальних дозувань добавок. Встановлено оптимальну тривалість активації, за якої досягається максимальний реологічний ефект. Надмірне подовження часу обробки, навпаки, призводить до надмірного подрібнення, збільшення питомої поверхні, підвищення водопотреби й можливого погіршення стабільності структури. Ізоповірхневий аналіз системи «дозування пластифікатора – тривалість активації – розтікання» підтвердив синергічний характер взаємодії цих параметрів: найбільший приріст рухливості спостерігається за поєднання помірної кількості пластифікатора з раціональною тривалістю механо-хімічної обробки, що забезпечує оптимальний баланс між текучістю та стійкістю суміші. Отримані результати дозволяють більш точно оптимізувати рецептуру та технологічний режим приготування ніздрюватих бетонів, підвищуючи технологічність, однорідність структури й експлуатаційні властивості готового матеріалу.

Ключові слова: ніздрюватий бетон, пластифікуючі добавки, полікарбоксилатні суперпластифікатори, механо-хімічна активація, водопотреба, рухливість розчинової суміші, ізоповірхні, оптимізація складу.

Стаття надійшла до редакції 14.01.2025

Стаття прийнята до друку 20.02.2026

Дата публікації статті 20.03.2026

[This work](#) © 2026 by [Martynov V.I., Taichan D.S.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

REGULATORY AND LEGAL CONCEPTUALIZATION OF ENERGY EFFICIENCY OF BUILDINGS

¹**Namchuk D.V.**, postgraduate,
d.v.namchuk@nuwm.edu.ua, ORCID: 0009-0008-0416-8990

¹**Dovbenko V.S.**,
v.s.dovbenko@nuwm.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9575-2931

¹*National University of Water Management and Environmental Management
Soborna St., 11, Rivne, 33028, Ukraine*

Abstract. The article is devoted to a comprehensive study of the regulatory and legal conceptualization of energy efficiency of buildings in Ukraine in the context of the implementation of European standards and the formation of a national legal regulation system. The evolution of the conceptual apparatus from the term "energy saving" to "energy efficiency" is analyzed, which reflects the transition from quantitative restrictions on consumption to improving the quality of energy use in accordance with the requirements of Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. The basic legislative acts are studied, in particular the Law of Ukraine "On Energy Performance of Buildings", the Law of Ukraine "On Energy Efficiency" and the creation of the Energy Efficiency Fund as an institutional mechanism for supporting the thermal modernization of residential buildings with total funding of over 2 billion UAH. The main legal regulatory instruments are identified: a system of mandatory energy certification of buildings, energy audit, minimum requirements for energy efficiency of new buildings and the concept of buildings with a near-zero energy consumption level. An analysis of by-laws and technical standards that form a comprehensive regulatory system from design to operation of buildings, including methods for calculating energy characteristics and energy efficiency classification, was carried out. It was established that Ukrainian legislation successfully integrates European approaches, creating a legal basis for a systematic reduction in energy consumption in buildings and achieving climate goals by 2050. The practical implementation of the concept demonstrates positive results in the period 2018-2023. The average level of energy savings after thermal modernization is 31.3%, which confirms the effectiveness of legal mechanisms for stimulating energy efficiency and the need for further improvement of the regulatory framework.

Keywords: energy efficiency of buildings, legal regulation, energy certification, thermal modernization, European integration, energy audit, sustainable development.

Introduction. Energy efficiency of buildings is a priority area of modern state policy in the context of global challenges of energy security and climate change. According to the European Commission, about 40% of total final energy consumption in EU countries is accounted for by buildings [1]. In Ukraine, the situation is complicated by the historically high energy intensity of the economy and the dilapidated housing stock. In particular, energy costs for heating a typical apartment in Ukraine are 2–3 times higher than the average in EU countries [2]. As a result, increasing the energy efficiency of buildings is considered a strategic way to reduce energy consumption, reduce greenhouse gas emissions, and save the population's costs for housing and communal services.

It should be noted that Ukraine, moving in line with European integration processes, has undertaken to implement EU regulations in the field of energy efficiency, in particular Directive 2012/27/EU on energy efficiency and Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings [3, 4]. The implementation of European standards in Ukraine takes place at the intersection of two important trends: ensuring sustainable (balanced) development and reforming national legislation in accordance with European standards. Domestic researchers A. Kalensky and T. Gerlyand rightly

note that the issues of legal support for energy efficiency of buildings are among the leading ones in the context of sustainable development law of today [5]. That is why, in recent years, a comprehensive regulatory and legal framework has been formed in Ukraine, which laid the conceptual and organizational foundations for ensuring the energy efficiency of buildings.

Analysis of recent research and publications. The issue of legal support for the energy efficiency of buildings was studied by domestic scientists A. Kalensky and T. Gerlyand, who rightly note that these issues are among the leading ones in the context of the law of sustainable development of our time [5]. Policy and regulatory updates have created clearer institutional requirements for minimum performance, certification, and management practices in buildings. However, it should be noted that official guidelines explicitly highlight methodological and procedural challenges that, if not addressed, will make regulations ineffective [6, 7]. O.O. Kravchuk critically assessed certain provisions of the legislative changes, in particular the premature introduction of administrative liability for unforeseen consequences of thermal modernization [8]. In modern Ukrainian scientific doctrine, we can find a similar position in the works of scientists who note the need to verify the proportionality, legal certainty and predictability of the consequences of sanctions, taking into account the real practice of law enforcement (S.B. Smereka, S.M. Lifirenko) [9]. Technical aspects of energy certification were studied by V.I. Deshko, M.M. Shovkalyuk, and Y.S. Kuzmina, who analyzed the database of energy efficiency certificates for buildings in Ukraine [10]. A. Ryabikov draws attention to the sensitivity of class assignment to data quality and accepted assumptions of the methods, which requires validation of models on real consumption and greater transparency of calculations [11]. Also noteworthy is the empirical study by S. Kovtun, O. Dekusha, and A. Ryabikov, who consider the quality of the initial parameters and the reproducibility of the methods, in particular in connection with audits and the tightness of enclosing structures [12]. Comparisons with European benchmarks for the building sector demonstrate that achieving target trajectories without synchronizing norm-setting, data and monitoring, reporting and verification (MRV) procedures appear problematic. Consequently, the national policy focus should shift from declarations to proven efficiency instruments. At the same time, there is a lack of comprehensive research that reveals the theoretical and legal foundations of the formation of the concept of energy efficiency of buildings in national legislation. An unsolved part of the problem remains the analysis of the evolution of the conceptual apparatus, the systematization of legal mechanisms and the assessment of the effectiveness of their practical implementation in the context of the implementation of European standards.

The purpose of the study is to conduct a comprehensive analysis of the regulatory and legal conceptualization of energy efficiency in buildings in Ukraine and to identify the features of its formation in the context of European integration. Achieving the goal requires the following tasks:

- analyze the evolution of the conceptual apparatus of energy efficiency of buildings in national legislation;
- investigate the system of basic legislative acts and their innovations in the field of energy efficiency of buildings;
- characterize the legal mechanisms for ensuring energy efficiency (certification, energy audit, minimum requirements);
- analyze secondary legislation and technical standards as elements of a comprehensive system;
- assess the practical effectiveness of legal mechanisms for stimulating energy efficiency of buildings.

Materials and research methods. The research was carried out on the basis of an analysis of the national legislation of Ukraine in the field of energy efficiency of buildings, including laws, by-laws, technical regulations and standards. Official reports of the Energy Efficiency Fund, statistical data on the implementation of thermal modernization programs, as well as scientific publications of domestic and foreign researchers were used. The methodological basis is the methods of comparative legal analysis for comparing Ukrainian norms with European directives, the systemic method for studying the relationships between different levels of legal regulation, the historical and

legal method for analyzing the evolution of the conceptual apparatus, as well as empirical analysis for assessing the practical effectiveness of legal mechanisms based on actual energy saving indicators after the implementation of energy efficiency measures.

Research results. The regulatory and legal conceptualization of energy efficiency of buildings begins with the definition of basic terms in the legislation. Energy efficiency in modern Ukrainian law is interpreted as a quantitative indicator of the ratio of the result (work, service, product or energy at the output) to the energy consumed at the input. This definition is enshrined in Art. 1 of the Law of Ukraine dated 21.10.2021 No. 1818-IX "On Energy Efficiency" (hereinafter referred to as the Law on Energy Efficiency) and corresponds to EU approaches focused on the optimal ratio of energy consumption and useful result [6].

At the same time, the special concept of "energy efficiency of a building" is formulated in the relevant law in the field of construction. In accordance with the provisions of Part 1, Article 1 of the Law of Ukraine dated 22.06.2017 No. 2118-VIII "On Energy Efficiency of Buildings" (hereinafter referred to as the Law on Energy Efficiency of Buildings), the energy efficiency of a building is defined as "a property of a building characterized by the amount of energy required to create proper living conditions and/or life activities of people in such a building" [7]. In other words, it is an integral indicator of the quality of a building in terms of energy consumption to ensure a comfortable environment.

For the sake of completeness of the conceptual apparatus, the Law on Energy Efficiency of Buildings introduces a number of related terms. In particular, the legislative level establishes the definition of a building with a near-zero energy consumption level – that is, a building whose energy efficiency exceeds the minimum established requirements and which uses energy from renewable sources to a significant extent. The aforementioned concept implements the European concept of nearly zero-energy building (NZEB) and sets a benchmark for the future development of the industry. The law also defines the energy certificate of a building as a document of a prescribed form that reflects the indicators and class of the building's energy efficiency and contains recommendations for their improvement. The concept of minimum requirements for energy efficiency or a set of regulatory indicators for buildings and their engineering systems, the implementation of which ensures an acceptable level of energy consumption, deserves special attention [7]. Thus, it can be argued that at the legislative level, criteria and indicators are clearly formulated through which the concept of energy efficiency of buildings is revealed.

It is worth noting the evolution of the state's approaches. For example, if the previous Law of Ukraine "On Energy Saving" of 1994 focused on the rational use and economical consumption of fuel and energy resources (the term "energy saving" was defined as an activity aimed at saving energy) [13], then modern legislation has moved to the term "energy efficiency", the meaning of which focuses more on the final useful result from the energy consumed. This change in concept reflects a shift from quantitative consumption limitation ("savings") to improving the quality of energy use ("efficiency"). In our opinion, the transformation of focus is justified, because it is precisely increasing energy efficiency, and not just energy savings, that can ensure long-term energy consumption reduction without compromising comfort and development.

It should be noted that the modern system of regulatory legal acts in the field of energy efficiency of buildings is formed primarily by two basic laws. The first is the already mentioned Law on Energy Efficiency of Buildings of 2017, which came into force in July 2018. It defined the legal, socio-economic and organizational principles of activities in the field of ensuring the energy efficiency of buildings and was aimed at reducing energy consumption in buildings. Simply put, the adoption of the law laid the foundation for the legal regulation of relations related to the assessment of the energy efficiency of buildings, the establishment of standards and the implementation of measures to increase the energy efficiency of existing and new buildings.

The main innovations of the Law on Energy Efficiency of Buildings were the introduction of a system of mandatory energy certification of buildings and energy audits. According to Part 1 of Article 7 of the Law, energy certification is mandatory for a number of categories of objects, in particular:

- for newly built buildings (or those undergoing reconstruction or major renovation) of significant and medium impact class (CC2, CC3);
- for state-owned buildings with a heated area of over 250 m², which are frequently visited by citizens and which house state authorities;
- for buildings of local government bodies with a heated area of over 250 m² (in case of thermal modernization);
- for buildings that are thermally modernized with state support (provided that the result is not lower than the established minimum energy efficiency class) [7].

Thus, the legislator has determined that the most significant public sector buildings and new projects are subject to mandatory control of their energy performance. In other cases, certification is carried out voluntarily by the owner's decision, but in the event of the sale or lease of a building, the owner is obliged to provide the potential buyer with information about the availability of an energy certificate. The certificate contains the energy efficiency class assigned to the building (from A to G) and recommendations for improving efficiency, which strengthens the motivation for energy modernization [10].

The Law on Energy Efficiency of Buildings also established requirements for energy audits. Energy certification is actually a separate type of energy audit of a building, which is carried out by independent certified energy auditors. In addition, regular inspections of heating and air conditioning systems in buildings are provided for, the results of which are recorded in reports with recommendations (the so-called energy audit of engineering systems). Liability has been introduced for failure to comply with these requirements. In accordance with the provisions of Art. 17 of the Law, violation of the requirements for mandatory certification and failure to provide relevant information entails sanctions provided for by the Code of Ukraine on Administrative Offences (hereinafter referred to as the Code of Administrative Offences of Ukraine). In particular, in 2017, Art. 96-2 was added to the Code of Administrative Offences, which provides for a fine for failure to place an extract from the energy certificate of a building in an accessible place or other violations in the field of energy efficiency of buildings [14]. Thus, the state has created mechanisms to control and encourage compliance with the requirements of the law.

It should be noted that the Law on Energy Efficiency of Buildings simultaneously amended other acts in order to harmonize the legal field. In particular, as already noted, it supplemented the Code of Administrative Offences of Ukraine with a new Article 96-2. However, scientists have critically assessed certain provisions of these amendments. According to O.O. Kravchuk, it was premature to introduce administrative liability of the customer of thermal modernization for unforeseen consequences. In particular, the requirement of the Law to notify the energy supplier of the expected reduction in energy/water consumption after thermal modernization and fines for failure to comply with this requirement (new Article 96-2 of the Code of Administrative Offences) are debatable. In his own work, the researcher proposed to exclude the aforementioned norm from the Code altogether, since it is premature and insufficiently substantiated [8]. Along with O.O. Kravchuk's position on the prematurity of certain obligations, Ukrainian authors also draw attention to other challenges of practical law enforcement. The already mentioned S. B. Smereka and S. M. Lifirenko, in particular, rightly point out that without procedural consistency of instruments (energy management, certification, ESCO), the effects of the policy are not verified and "dissolve" at the implementation stage [9]. Representative of the Volyn scientific community V.S. Hrachuk emphasizes the need for legal certainty and compatibility with EU requirements to ensure predictability [15].

A similar position can be found in P.V. Rekotov and V.L. Kovalenko, who rightly note that the effectiveness of energy conservation/energy efficiency policy is determined by the creation of norms and the coherence of organizational and legal mechanisms (market methods of regulation, the introduction of program documents, technical regulation (technical regulations, DSTU, TU), the implementation of self-regulation elements with delegated powers). In their own work, the authors argue that without proper institutional capacity, standardization of procedures and resource/staffing, new requirements are not converted into the expected result. For the building sector, this means the

need to synchronize technical regulation (minimum requirements, methodologies), management practices (energy management, MRV) and financial incentives (ESCO, etc.) so that the assessment of effects has proper verifiability and legal certainty [16].

Considering the gradual development of the regulatory framework, it should be noted that no less important act was the Law of Ukraine dated 08.06.2017 No. 2095-VIII "On the Energy Efficiency Fund", adopted in a package with the previous one. In accordance with the provisions of the Law, a new state institution was created – the Energy Efficiency Fund, the purpose of which is to support the implementation of energy-efficient measures in buildings (primarily in the residential sector) by financing thermal modernization projects. The Energy Efficiency Fund provides grants to associations of co-owners of apartment buildings (OSBB) and other entities for insulation, modernization of heating systems, installation of energy-saving equipment, etc. By applying to the Fund's support programs, Ukrainian households received a financial incentive to increase the energy efficiency of their buildings, which is an important component of national experience [17].

The next important stage was the adoption of the Framework Law on Energy Efficiency of 2021. It entered into force partially in 2022, and in full in 2023–2024, replacing the outdated Law "On Energy Saving". It should be noted that the Law has a broader subject of regulation, going beyond the construction industry, and establishes general rules for ensuring energy efficiency in the production, transportation, distribution and consumption of energy. In the part concerning buildings, Law No. 1818-IX supplemented and expanded the previous norms. In particular, it established a requirement that state authorities and local governments can rent or purchase only those buildings whose energy efficiency class is not lower than the minimum requirements. In our opinion, the innovation stimulates the public sector to switch to energy-efficient premises. The law also introduces mandatory implementation of energy management systems in government bodies, which is implemented in practice through the creation of units or appointment of responsible persons responsible for monitoring energy consumption and implementing energy efficiency measures. Large enterprises are required to conduct an energy audit of their facilities every 4 years, which indirectly affects commercial real estate (office and industrial buildings). It is important that the Law also provides for the development of a National Action Plan for Energy Efficiency and the creation of an information system for monitoring energy efficiency, which also covers the field of buildings [6]. Thus, legal regulation goes beyond purely building codes and covers the full cycle of energy efficiency management (standards, minimum requirements, energy management, regular audits, national planning). The combination of legal regulation with the use of an effective monitoring information system allows for measurability and reporting, making the consequences of the policy predictable and accountable.

It should be noted separately that the regulatory concept of energy efficiency of buildings also includes by-laws and technical standards. At the by-law level, the specified strategic approach is reflected in interrelated resolutions of the Cabinet of Ministers, orders of the central body in the field of construction and technical standards, which set a transparent trajectory for construction entities from measurement to verification of the results of thermal modernization. In accordance with par. 1, clause 1 of the resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 23.12.2021 No. 1460 "On the implementation of energy management systems", state authorities and institutions implement energy management systems with fixation of policies, roles and procedures for energy monitoring, which creates an organizational framework for planning and controlling activities in buildings [18].

In accordance with the provisions of the Order of the Ministry of Community and Territorial Development of Ukraine dated October 27, 2020 No. 260 "On Approval of Minimum Requirements for Energy Efficiency of Buildings", threshold values of energy efficiency indicators for building envelopes and engineering systems have been established, which are subject to periodic review and directly applied in design and operational documentation [19].

In addition, according to the orders of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine dated 11.07.2018 No. 169 "On approval of the Methodology for determining the energy efficiency of buildings", No. 171 "On approval of the Procedure for applying calculation

elements of software for determining the energy efficiency of buildings", No. 172 "On approval of the Procedure for conducting energy efficiency certification and the form of an energy certificate" and No. 173 "On approval of the Methodology for inspecting building engineering systems", calculation algorithms, software suitability criteria, certification procedure and instrumental inspections of systems have been standardized, which makes it impossible to make technical conclusions arbitrary and increases the reproducibility of results [20-23].

In accordance with the provisions of the order of the Ministry of Community and Territorial Development of Ukraine dated October 28, 2024 No. 1196 "On approval of the Procedure for monitoring the achievement of the energy saving target indicator in buildings of state authorities", an annual MRV cycle has been introduced with formulas for calculating the target achievement indicator and a fixed list of typical measures with a regulatory effect, which translates monitoring into the plane of mandatory management procedures for public buildings [24]. Also worth mentioning are the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 21.10.2015 No. 845 "On Approval of the Model Energy Service Agreement" and the Law of Ukraine dated 09.04.2015 No. 327-VIII "On the Introduction of New Investment Opportunities, Guaranteeing the Rights and Legitimate Interests of Business Entities for Large-Scale Energy Modernization", which establish the legal model of ESCO contracting with the methods of the baseline level of consumption and verification of the achieved result, which allows financing modernization without initial budget investments [25, 26].

In accordance with the provisions of DBN V.1.2-11:2021 "Basic requirements for buildings and structures. Energy saving and energy efficiency" and DBN V.2.6-31:2021 "Thermal insulation and energy efficiency of buildings", the requirements for achieving target energy efficiency classes and the methodology for thermal engineering calculations of enclosing structures, which are mandatory during design, reconstruction and overhaul, are established [27, 28].

Additionally, in accordance with the provisions of the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated December 29, 2021 No. 1803-r "On Approval of the National Energy Efficiency Action Plan for the Period until 2030", public policy sets indicators and consumption reduction trajectories for the construction sector, which are integrated into local energy plans [29]. In our opinion, this combination of measurability through commercial accounting, management capacity through energy management systems, and technical certainty through DBN and methodologies forms a meaningful construct of "energy management as a right" in construction, reducing regulatory uncertainty for the customer and designer.

The analysis of the above documents and scientific works gives the author reason to assert that the regulatory and legal conceptualization of energy efficiency of buildings in Ukraine has undergone intensive development over the past decade. Today, it can be stated that a modern conceptual apparatus has been formed, harmonized with the European one (energy efficiency, building class, minimum requirements, Nearly Zero Energy Building, etc.), and an institutional infrastructure has been created (Energy Efficiency Fund, energy audit system, energy management, state monitoring of indicators). The practical implementation of the energy efficiency concept is already bringing results in the form of numerous thermal modernization projects. For example, according to the official results of the Energy Efficiency Fund, within the framework of the "Energodim" program in 2019–2024. hundreds of thermal modernization projects of apartment buildings have already been implemented or partially completed; the average confirmed level of energy savings after the measures is 31.3% (insulation of enclosing structures, installation of ITP, modernization of engineering systems, etc.), which empirically fits into the typical ranges of 20–50% for complex solutions. Detailed aggregated indicators (675 projects in progress, over 380 implemented; annual energy savings of ≈ 310 million kWh; reduction of CO₂ emissions of ≈ 84 thousand tons/year) are provided in the FEE report on the five-year anniversary of the program [30].

Mandatory certification of public sector buildings revealed the real state of energy consumption and stimulated the implementation of energy-saving measures in schools, hospitals, and institutions. Thus, the Ukrainian experience of regulatory and legal support for energy efficiency of buildings can be considered a successful example of how legislative initiatives are

transformed into specific changes in the construction industry and housing and communal services. At the same time, challenges remain, in particular, the need to ensure full implementation of the adopted standards. In practice, far from all owners and managers of buildings conscientiously comply with the requirements for certification or energy audit, so a more effective system of control and incentives is needed. Sanctions for violations in the field of energy efficiency are still infrequently applied, and therefore, the mechanisms for their implementation should be improved. The issue of updating building standards is also relevant, technologies are developing rapidly, and regulatory requirements require periodic revision (which, by the way, is foreseen, the Ministry of Regional Development reviews the minimum requirements every 5 years) [31].

No less important is the further integration of Ukraine into the European Green Deal. The implementation of updated EU requirements is expected, in particular, regarding the complete decarbonization of buildings by 2050, the introduction of even more ambitious standards (for example, class A0 - buildings with a zero energy balance). The legislative framework will develop in accordance with these goals, providing legal instruments to achieve them.

Conclusions. The regulatory and legal conceptualization of energy efficiency in buildings in Ukraine currently includes clear definitions of basic concepts and a set of legal mechanisms for the practical implementation of energy efficiency policy. Requirements for buildings at all stages of the life cycle have been established (through building codes, energy certification, energy audit and monitoring). European approaches have been integrated into national legislation, which is confirmed by the consistency of Ukrainian norms with EU directives. The state has taken a course towards a systematic reduction in energy consumption in buildings by legally regulating the minimum permissible indicators and stimulating an increase in the energy efficiency class of each building.

Thus, we can speak of a legal concept of energy efficiency in buildings formed in Ukraine, which is based on the priority of rational use of energy without loss of comfort and functionality of buildings. The aforementioned concept serves as an important element of the strategy of sustainable development and energy security of the state. Further improvement of legislation in this area, taking into account scientific recommendations and European experience, will contribute to achieving the set goals (reducing energy consumption, financial savings for citizens and improving the environmental quality of the architectural environment). In summary, the regulatory concept of energy efficiency of buildings in Ukraine meets modern challenges and forms the basis for future generations of energy-saving and comfortable buildings.

Prospects for further research. In our opinion, the following are relevant areas for future scientific exploration:

- empirical validation of the relationship between energy efficiency requirements and actual consumption indicators in different types of buildings;
- comparative legal analysis of the implementation of the updated EU Buildings Directive (EPBD recast) in the part of nZEB/zero-emission buildings and its adaptation to Ukrainian realities;
- assessment of the effectiveness of MRV procedures and data standards for energy certification (including the quality of input parameters and reproducibility of methodologies);
- study of the proportionality of administrative obligations and incentives (in particular for the public sector) through the prism of law enforcement practice;
- legal models of financing deep thermal modernization (ESCO, "green" banking, municipal instruments) and risk sharing between participants.

In our opinion, the institutional capacity of local governments to implement energy management and integrate local energy plans with the National Energy Efficiency Action Plan requires separate study.

References

- [1] "In focus: Energy efficiency in buildings", *European Commission*. [Online]. Available: <https://commission.europa.eu/news-and-media/news/focus-energy-efficiency-buildings->

- [2020-02-17 en](#). Accessed on: August 8, 2025.
- [2] A. Ivantsova, "Energy Efficiency Of Residential Buildings: There Are Successes, But They Are Few", *VoxUkraine*. [Online]. Available: <https://voxukraine.org/en/energy-efficiency-of-residential-buildings-there-are-successes-but-they-are-few>. Accessed on: August 8, 2025.
- [3] "On energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC", Directive 2012/27/EU, October 25, 2012. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027>. Accessed on: August 8, 2025.
- [4] "On the energy performance of buildings", Directive 2010/31/EU, May 19, 2010. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031>. Accessed on: August 8, 2025.
- [5] A. Kalenskyi and T. Herliand, "Normatyvno-pravove zabezpechennia vykorystannia enerhoefektyvnykh tekhnolohii u profesiinii diialnosti budivelnykiv", *Naukovo-metodychne zabezpechennia profesiinoi osvity*, vol. 1, no. 22, pp. 243–250, 2025. [Online]. Available: https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/745221/1/Каленський_Герлянд_стаття.pdf. Accessed on: August 8, 2025.
- [6] "Pro enerhetychnu efektyvnist", Law of Ukraine No. 1818-IX, October 21, 2021. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>. Accessed on: August 8, 2025.
- [7] "Pro enerhetychnu efektyvnist budivel", Law of Ukraine No. 2118-VIII, June 22, 2017. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>. Accessed on: August 8, 2025.
- [8] O. Kravchuk, "Pravove zabezpechennia enerhoefektyvnosti budivel - odne z kliuchovykh pytan prava staloho rozvytku", *Budivelne pravo: problemy teorii i praktyky*, Kyiv, 2017, pp. 127–132. [Online]. Available: <https://shorturl.at/nDb6A>. Accessed on: August 8, 2025.
- [9] S. B. Smereka and S. M. Lifyrenko, "Osoblyvosti normatyvno-pravovoho zabezpechennia shchodo zabezpechennia enerhoefektyvnosti", *Visnyk Skhidnoukrajnskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, no. 3 (289), pp. 87–92, 2025. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-289-3-87-92>.
- [10] V. Deshko, M. Shovkaliuk and Y. Kuzmyna, "Database of certificates of energy efficiency of buildings in Ukraine: analysis for new construction", *Power Engineering: Economics, Technique, Ecology*, no. 1, pp. 20–26, 2021. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2021.242123>.
- [11] A. Riabikov, "Analysis of the regulatory and legislative base of Ukraine and the European experience in conducting energy audits of buildings", *System Research in Energy*, vol. 2024, no. 3, pp. 62–69, 2024. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.03.062>.
- [12] S. Kovtun, O. Dekusha and A. Riabikov, "Metodolohiia kontroliu hermetychnosti budivelnykh konstrukttsii pid chas vidnovlennia zhytloвого fondu", *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi*, vol. 2a, no. 78, pp. 40–42, 2024. [Online]. Available: <https://systemre.org/index.php/journal/article/view/851>. Accessed on: October 8, 2025.
- [13] "Pro enerhozberezhennia", Law of Ukraine no. 74/94-VR, July 1, 1994. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-вр#Text>. Accessed on: August 2, 2025.
- [14] "Kodeks Ukrainy pro administratyvni pravoporushennia (statti 1 - 212-24)", Code of Ukraine no. 8073-X, December 7, 1984. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80731-10#Text>. Accessed on: August 8, 2025.
- [15] V. S. Hrachuk, "Legal regulation of energy relations in Ukraine in the context of sustainable development", *Uzhhorod National University Herald. Series: Law*, vol. 3, no. 86, pp. 107–113, 2025. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.86.3.16>.
- [16] P. V. Rekotov and V. L. Kovalenko, "Orhanizatsiino-pravove zabezpechennia enerhozberezhennia v Ukraini: etapy formuvannia", *Legal Position*, no. 4, pp. 101–106, 2024. <https://doi.org/10.32782/2521-6473.2024-4.18>.
- [17] "Pro Fond enerhoefektyvnosti", Law of Ukraine no. 2095-VIII, June 8, 2017. [Online].

- Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2095-19#Text>. Accessed on: August 8, 2025.
- [18] "Pro vprovadzhennia system enerhetychnoho menedzhmentu", Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine no. 1460, December 23, 2021. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1460-2021-п#Text>. Accessed on: August 8, 2025.
- [19] "Pro zatverdzhennia Minimalnykh vymoh do enerhetychnoi efektyvnosti budivel", Order of the Ministry of Development of Communities and Territories no. 260, October 27, 2020. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20#Text>. Accessed on: August 8, 2025.
- [20] "Pro zatverdzhennia Metodyky vyznachennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel", Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine no. 169, July 11, 2018. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-18#Text>. Accessed on: August 8, 2025.
- [21] "Pro zatverdzhennia Poriadku zastosuvannia rozrakhunkovykh elementiv prohramnoho zabezpechennia dlia vyznachennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel", Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine no. 171, July 11, 2018. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0824-18#Text>. Accessed on: August 8, 2025.
- [22] "Pro zatverdzhennia Poriadku provedennia sertyfikatsii enerhetychnoi efektyvnosti ta formy enerhetychnoho sertyfikata", Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine no. 172, July 11, 2018. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0825-18#Text>. Accessed on: August 8, 2025.
- [23] "Pro zatverdzhennia Metodyky obstezhennia inzhenernykh system budivli", Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine no. 173, July 11, 2018. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0826-18#Text>. Accessed on: August 8, 2025.
- [24] "Pro zatverdzhennia Poriadku zdiisnennia monitorynhu dosiahnennia tsilovoho pokaznyka ekonomii enerhii u budivliakh orhaniv derzhavnoi vlady", Order of the Ministry of Development of Communities and Territories no. 1196, October 28, 2024. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1802-24#Text>. Accessed on: August 8, 2025.
- [25] "Pro zatverdzhennia Prymirnogo enerhosernisnogo dohovoru", Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine no. 845, October 21, 2015. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/845-2015-п#Text>. Accessed on: August 8, 2025.
- [26] "Pro zaprovadzhennia novykh investytsiinykh mozhlyvostei, harantuvannia prav ta zakonnykh interesiv subiektiv pidpryiemnytskoi diialnosti dlia provedennia masshtabnoi enerhomodernizatsii", Law of Ukraine no. 327-VIII, April 9, 2015. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/327-19#Text>. Accessed on: August 8, 2025.
- [27] "Osnovni vymohy do budivel i sporud Enerhozberezhennia ta enerhoefektyvnist", State Building Norms of Ukraine DNB V.1.2-11:2021, December 30, 2021. [Online]. Available: <https://ips.ligazakon.net/document/DBN00032>. Accessed on: August 8, 2025.
- [28] "Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel", State Building Norms of Ukraine DNB V.2.6-31:2021, December 30, 2021. [Online]. Available: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3075196638495507996. Accessed on: August 8, 2025.
- [29] "Pro Natsionalnyi plan dii z enerhoefektyvnosti na period do 2030 roku", Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine no. 1803-r, December 29, 2021. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-п#Text>. Accessed on: August 8, 2025.
- [30] "Prohrami 'Enerhodim' – p'iat rokiv!", *Fond Enerhoefektyvnosti*. [Online]. Available: <https://eefund.org.ua/novyny/prohrami-energodim-pyat-rokiv/>. Accessed on: August 8, 2025.
- [31] "23 lypnia v Ukraini pochynaie diiaty zakon pro enerhoefektyvnist budivel", *Asotsiatsiia "Enerhoefektyvni mista Ukrainy"*. [Online]. Available: <https://shorturl.at/IBu5w>. Accessed on: August 8, 2025.

**НОРМАТИВНО-ПРАВОВА КОНЦЕПТУАЛІЗАЦІЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
БУДІВЕЛЬ**¹Намчук Д.В., аспірант,

d.v.namchuk@nuwm.edu.ua, ORCID: 0009-0008-0416-8990

¹Довбенко В.С.,

v.s.dovbenko@nuwm.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9575-2931

¹Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028, Україна

Анотація. Стаття присвячена комплексному дослідженню нормативно-правової концептуалізації енергоефективності будівель в Україні в контексті імплементації європейських стандартів та формування національної системи правового регулювання. Проаналізовано еволюцію понятійного апарату від терміну "енергозбереження" до "енергоефективність", що відображає перехід від кількісного обмеження споживання до підвищення якості використання енергії відповідно до вимог Директиви 2010/31/ЄС про енергетичні характеристики будівель та Директиви 2012/27/ЄС про енергоефективність. Досліджено базові законодавчі акти, зокрема Закон України "Про енергетичну ефективність будівель", Закон України "Про енергетичну ефективність" та створення Фонду енергоефективності як інституційного механізму підтримки термомодернізації житлових будинків із загальним фінансуванням понад 2 млрд грн. Визначено основні правові інструменти регулювання: систему обов'язкової енергетичної сертифікації будівель, енергоаудит, мінімальні вимоги до енергоефективності новобудов та концепцію будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії. Здійснено аналіз підзаконних актів та технічних стандартів, що формують комплексну систему регулювання від проєктування до експлуатації будівель, включаючи методики розрахунку енергетичних характеристик та класифікацію енергоефективності. Встановлено, що українське законодавство успішно інтегрує європейські підходи, створюючи правові основи для системного зменшення енергоспоживання у будівлях та досягнення кліматичних цілей до 2050 року. Практична реалізація концепту демонструє позитивні результати у період 2018-2023 років. Середній рівень економії енергії після термомодернізації становить 31,3%, що підтверджує ефективність правових механізмів стимулювання енергоефективності та необхідність подальшого вдосконалення регуляторної бази.

Ключові слова: енергоефективність будівель, правове регулювання, енергетична сертифікація, термомодернізація, європейська інтеграція, енергоаудит, сталий розвиток.

Стаття надійшла до редакції 6.11.2025

Стаття прийнята до друку 26.12.2025

Дата публікації статті 20.03.2026

[This work](#) © 2026 by [Namchuk D.V., Dovbenko V.S.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

INVESTIGATION OF STRUCTURE FORMATION PROCESSES IN LIME-BASED RESTORATION COMPOSITES

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

¹**Levytskyi D.V.**, postgraduate student,
924ldv@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5350-522X

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

Abstract. The operational properties of composite materials are largely determined by the processes that occur at the beginning of their structure formation. Volumetric changes and plastic strength are considered as informative indicators reflecting the processes of structure formation and adaptation of lime restoration composites (plaster compositions) in the early stages of hardening. It is shown that these characteristics are sensitive to changes in the internal structure of the material, in particular to the coagulation of dispersed particles, the development of interphase contacts, and the formation of a spatially connected composite structure. The results demonstrate that volumetric changes and plastic strength reflect different but interrelated aspects of a single process—the formation of the internal structure of the composite and therefore can be considered as complementary indicators of structural evolution. The correlation between these indicators determines the ability of the restoration mortar to adapt to the deformation and moisture exchange characteristics of the porous limestone base without accumulating critical internal stresses. Based on experimental data, regression models and graphical dependencies were constructed, which clearly reflect the influence of composition on the nature of volumetric deformations and the kinetics of plastic strength growth. The obtained isosurfaces and time curves allow interpreting the change in properties through the dominance of certain mechanisms of structure formation at different stages of hardening. It has been shown that varying the composition of the composite allows for targeted control of the balance between deformability and the rate of increase in structural cohesion, which is a key factor in the formation of a compatible and stable contact zone. The results obtained confirm the possibility of using volumetric changes and plastic strength as a methodological basis for predicting the behavior of restoration mortars and adaptation processes in the "restoration mortar – base material" system and for designing plaster compositions focused on long-term compatibility and preservation of historic shell limestone buildings.

Keywords: structure formation, volumetric deformations, plastic strength, composite materials, adaptation, lime mortar, restoration composites.

Introduction. When carrying out restoration work on historic buildings made of shell limestone, an important stage is the design of plaster restoration composites. Along with the use of modern innovative materials for finishing and restoring shell limestone buildings, traditional lime mortars with fillers and additives remain relevant. The use of such composites ensures maximum compatibility in terms of vapor permeability and mechanical properties of the materials used with the base, which allows preserving the natural moisture exchange regime and maximum authenticity of the structure.

When researching lime composites with the aim of obtaining materials with the appropriate level of operational properties, dependencies of the "composition-technology-property" type are traditionally used, in which the main focus is on the quantitative content of individual components and the technology for obtaining materials. At the same time, as a rule, the internal organization of the material is not taken into account, the reasons for synergistic or antagonistic effects when combining components are not explained, and the empirical models obtained are poorly suited for analyzing the temporal evolution of properties. As a result, their predictive ability is limited, and the connection with the physical nature of the observed phenomena remains indirect. Overcoming these limitations requires a transition from a purely compositional description to a thorough analysis of the

structure-forming processes occurring in the material, with the aim of further targeted control of the necessary operational properties. Thus, the study of the dynamic processes of structure formation in composite materials is a highly relevant task.

The properties that can give an idea of the processes of structure formation in the studied composites include volumetric deformations that occur during the hardening of restoration mortars and the plastic strength kinetics. These properties are particularly important for predicting the adaptive behavior of plaster mortars in the "plaster layer – shell limestone" system, as they ensure the coordination of composite deformations with the deformation response of the porous carbonate base and minimize internal stresses in the contact zone.

Thus, research and analysis of volumetric deformations and plastic strength in lime-based restoration composites is an important task for obtaining materials with the necessary set of operational properties and maximum compatibility with shell limestone.

Analysis of recent research and publications. When designing lime-based restoration composite compositions, the main task is to ensure maximum compatibility between the mortars and the base material [1, 2]. For porous carbonate rocks, such as shell limestone, compatibility is ensured by the consistency of both physicochemical and mechanical properties, as well as structural indicators and the formation of a mutually adapted "plaster layer – porous carbonate base" system [3-5].

The formation of the properties of composite building materials is inextricably linked to the processes of structure formation, which unfold over time and cover a wide range of spatial scales [6-8]. In binding systems and composites based on them, it is the structure that arises and evolves during the hardening process that determines the mechanical, deformation, and rheological characteristics of the material, as well as the patterns of their temporal change. At the same time, the structure of the material is not predetermined or static – it is the result of a complex non-equilibrium process of growth, restructuring, and interaction of structural elements, which includes coagulation and aggregation of particles, the formation of contact bonds, various interfaces and microcracks, the development of clusters, and the transition to a coherent, percolation network [6-9].

Significant characteristics are not so much the specific values of the parameters of a fixed structure at a given moment in time, but rather the ways in which they develop – that is, the processes of structure formation. It is the evolution of the structure, rather than its final state, that is more closely related to the general laws of physics, chemistry, and geometry of the processes occurring in composite materials [6, 9]. An essential aspect of such a structure-oriented approach is to consider structure formation processes not as the independent growth of individual subsystems, but as their mutual adaptation and restructuring. In this context, it is appropriate to use the concept of adaptation of composite components to each other [10], which manifests itself in the emergence of cooperative effects, changes in the kinetics of structure formation, and the formation of an effective structure whose properties cannot be reduced to the simple sum of the properties of individual components.

The integral-structural properties that determine the dynamics of structural processes include, for example, volumetric changes in the hardening composite and plastic strength. Plastic strength characterizes the emergence and development of the structural network, while volumetric changes reflect its compaction and reduction in free volume. Despite the difference in physical nature, both properties are determined by a single process of structure formation.

The objective processes that occur during the formation of the structure of filled composite materials cause a change in the volume of both local areas and the volume of the entire system as a whole. When filler particles are introduced into the matrix material of the binder, processes occur that lead to the formation of structural aggregates – clusters. Also, a layer appears on the surface of the fillers, the structure and properties of which differ from the properties of the composite in volume and depend to a large extent on the structure of the filler surface. As a result of such processes of forming the structure of building composites, density fluctuations occur, leading to volumetric deformations of the hardening composite mortar [11]. The uneven spatial distribution of structural elements causes local stresses, which in the early stages of hardening can partially relax due to plastic deformations, and with the subsequent increase in the rigidity of the system, are fixed in the form of shrinkage deformations. Thus, the nature and magnitude of volumetric changes are determined not only by the phase composition of the composite [12], but also by the kinetics of structure formation and the interaction between the matrix and the surface of the fillers.

The plastic strength of composite binder systems in the early stages of hardening is an integral characteristic that reflects the formation of a load-bearing structural network capable of transferring stress in the mode of irreversible deformation [13-15]. Unlike fracture strength, which is determined by the ultimate stability of the formed contacts, plastic strength is formed in the process of gradual structure formation and is sensitive to the topology, connectivity, and heterogeneity of the growing network.

Physical plastic deformation in composites as systems corresponds to the collective rearrangement of contacts between structural elements – binder particles, hydration products, additive particles, filler grains, and their aggregates. Therefore, plastic strength is not an instantaneous value, but develops over time as a result of a relaxation process associated with the growth and rearrangement of the cluster-network system.

The change in the plastic strength of plaster composites over time reflects a complex multistage process of internal material structure formation, which includes the coagulation of dispersed particles, the formation of contacts between solid phases, and the gradual transition of the system from a viscoplastic to a shear-deformation state [13, 14, 16, 17]. In the early stages of hardening, plastic strength is determined mainly by physical interparticle interactions caused by van der Waals forces, electrostatic and capillary effects, which form a coagulation structure with reversible contacts. In this case, shear resistance arises from the cumulative effect of a large number of weak bonds, and plastic strength can be described within the framework of the classical Bingham rheological model [17, 18], where the yield stress τ is identified with the plastic strength of the material (1):

$$\tau = R_{pl} + \eta\gamma, \quad (1)$$

where R_{pl} – plastic strength (ultimate shear stress), Pa; η – plastic viscosity, Pa·s; γ – shear rate, s⁻¹.

As the material hardens, the R_{pl} value increases, reflecting an increase in the degree of structural cohesion of the system.

Further development of plastic strength is associated with the transition from a purely coagulation structure to a coagulation-crystallization structure, when, along with physical contacts, more stable chemical and physicochemical bonds appear, caused by the processes of hydration of binding components, sorption interactions of dispersed particles, and gradual crystallization of hardening products. From the point of view of physically-chemical mechanics [16], the increase in plastic strength during this period may be associated with an increase in the number of contacts between particles and their average strength, which is generally described by the relationship (2):

$$R_{pl} = k \cdot n \cdot F_c, \quad (2)$$

where n – the number of effective contacts per unit volume, m⁻³; F_c – the average interparticle interaction force, N; k – the geometric coefficient.

Thus, plastic strength increases both as a result of structure densification (increase in n) and as a result of qualitative evolution of the contacts themselves (increase in F_c).

In terms of time, plastic strength is not a constant material characteristic, but rather an integral parameter that reflects the current state of the material's structure formation. Its kinetics are determined not only by the speed of chemical or physicochemical reactions, but also by the consistency of geometric and mechanical connections between the components of the composition, the degree of formation of a spatially connected framework, and the ability of the system to redistribute deformations [19, 20]. That is why plastic strength is a sensitive indicator of the early hardening of plaster composites and allows a quantitative assessment of the transition of the material from a rheologically controlled state to a structurally stabilized one, which is of fundamental importance for the technological and operational reliability of plaster and restoration systems.

Thus, by analyzing the volumetric changes and plastic strength of restoration lime composites, it is possible not only to quantitatively assess the intensity of early structure formation processes, but also to predict the adaptive behavior of the material in the "plaster layer – stone base" system. A combined consideration of these two characteristics allows us to determine the extent to which the formed structure of the composite is capable of coordinating its own deformations with the deformation response of the shell limestone base, which is characterized by increased porosity, anisotropy, and sensitivity to moisture exchange processes.

Volumetric deformations occurring in the early stages of hardening determine the level of

internal stresses in the plaster layer and in the contact zone with the base. Excessive volume changes in conditions where the structure is not yet sufficiently formed can lead to local stress concentration, disruption of adhesive bonds, and the initiation of microcracks in the surface layers of shell limestone. At the same time, the development of plastic strength characterizes the material's ability to relax these stresses through creep and redistribution of deformations without losing the integrity of the layer. That is why plastic strength at a fixed moment of early hardening is an indicator of whether the system is transitioning from a deformation-unstable state to an adapted, structurally bound mode of operation.

Thus, a comprehensive analysis of volumetric deformations and plastic strength allows us to predict not only the early kinetics of hardening, but also the long-term operational behavior of the restoration material in contact with historic masonry. This is fundamentally important when designing compositions for the restoration and renovation of shell limestone buildings, as it ensures the formation of an adaptive, compatible, and structurally stable "plaster – base" system capable of functioning without accumulating destructive stresses during operation.

Purpose of the work is to research into the kinetics of volumetric deformations and plastic strength of lime-based restoration composites in order to identify patterns of early structure formation and adaptation and to predict the compatibility of composite materials with porous limestone bases.

Materials and methods of research. The composite material under study is intended for use as a plastering mortar in conservation and restoration works. The main components of the studied mortar are air lime, Portland cement, clay additive (kaolin clay), quartz sand, and crushed limestone (specific surface area 3000 cm²/g) as a structurally compatible filler. The quantitative ratios and levels of variation of the composition factors in the planned experiment according to a 15-run experimental design are shown in Table 1.

Table 1 – Factors of the planned experiment and their levels of variation

№	Factors	Coded values			Values, %		
		Min	Center	Max	Min	Center	Max
X ₁	The content of cement in the total mixture of binders	-1	0	1	5 %	10%	15 %
X ₂	The content of clay in the total mixture of binders	-1	0	1	5 %	7,5%	10 %
X ₃	The content of ground limestone in the filler	-1	0	1	0 %	37,5%	75 %

We monitored the volumetric deformations of hardening compositions and changes in plastic strength over time.

Volumetric deformations were determined using a specially designed device, the diagram of which is shown in Fig. 1.

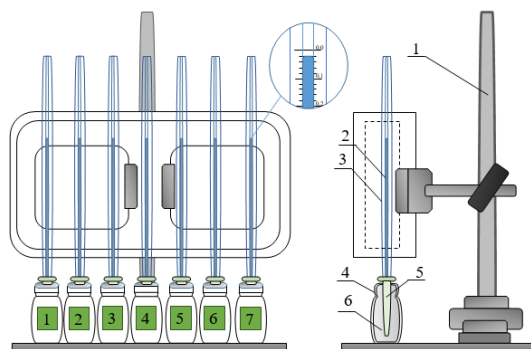


Fig. 1. Device for determining volume changes in hardening mortars:

1 – stand; 2 – colored liquid; 3 – pipette; 4 – container for mortar; 5 – rubber tip; 6 – hardening mortar

Volumetric changes were calculated using the formula (3):

$$\Delta V = \frac{\Delta V_{pipette}}{V_{mortar}} \cdot 100\% , \quad (3)$$

where V_{mortar} – the volume of the mortar, mm^3 ; $\Delta V_{pipette}$ – the difference in volume values of the colored liquid, mm^3 (4):

$$\Delta V_{pipette} = V_{pipette_{n+1}} - V_{pipette_n} \quad (4)$$

The plastic strength was determined using the Rebinder method with a conical plastometer, Fig. 2.

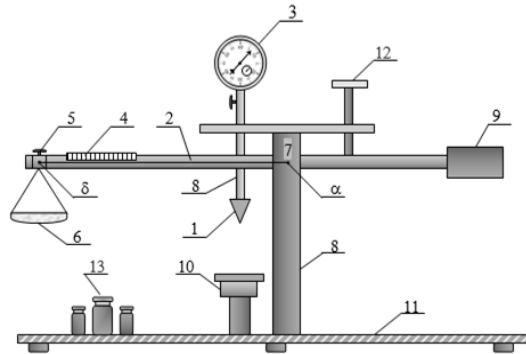


Fig. 2. Rebinder's conical plastometer: 1 – metal cone; 2 – lever (rocker arm); 3 – indicator; 4 – ruler; 5 – clamp; 6 – tray; 7 – lever suspension point; 8 – stand; 9 – counterweight; 10 – movable table; 11 – base plate; 12 – bolt; 13 – set of weights

Research results. Let us consider the processes of structure formation in the studied lime composites that contribute to the formation of volumetric deformations. Volumetric changes in hardening mortars in the studied time interval are characterized by monotonic negative deformation and therefore can be further considered as contraction.

Volumetric changes (contraction) in a hardening plaster restoration compound based on lime with a small addition of cement, clay, and a combined filler (sand + crushed shell limestone) are the result of the combined action of physicochemical and structural-mechanical processes occurring at different scale levels – from the nanopores of the binder matrix to the structure of the intermediate scale level of the filled composite. Contraction is formed as an integral effect of the restructuring of the solid phase, pore space, and interphase interfaces and microcracks during hardening and drying. In the early stages of structure formation, the formation of a spatial network of contacts between the particles of the lime binder and the products of cement hydration plays a decisive role.

Hydrated lime $\text{Ca}(\text{OH})_2$ forms a dispersed colloidal system in which the initial contraction is caused by particle coagulation and compaction of flocculated aggregates. This process can be described by the decrease in gel volume V_g over time t (5):

$$\varepsilon_g(t) = \frac{V_g(t) - V_{g0}}{V_{g0}} < 0, \quad (5)$$

where V_{g0} – the initial volume of the gel phase.

The addition of a small amount of cement leads to the formation of calcium hydrosilicates (C-S-H), which have significantly higher specific surface energy and self-compacting properties. The chemical shrinkage of the cement component can be expressed by the difference in the molar volumes of the reactants and hydration products (6):

$$\varepsilon_{ch} = \frac{\sum_i v_i V_i^{\text{prod}} - \sum_j v_j V_j^{\text{react}}}{\sum_j v_j V_j^{\text{react}}}, \quad (6)$$

where v_i, v_j – stoichiometric coefficients; $V_i^{\text{prod}}, V_j^{\text{react}}$ – molar volumes of the corresponding phases.

The further drying and carbonization of lime is accompanied by the development of capillary stresses P_c in pores with radius r , the magnitude of which is described by the Kelvin–Laplace equation (7):

$$P_c = -\frac{2\gamma \cos \theta}{r}, \quad (7)$$

where γ – the surface tension of a porous fluid; θ – contact angle of wetting.

The integration of capillary stresses according to the distribution of pores by size causes macroscopic shrinkage deformation (8):

$$\varepsilon_{cap} = \frac{1}{K_{eff}} \int_{r_{min}}^{r_{max}} P_c(r) \cdot f(r) \cdot dr, \quad (8)$$

where K_{eff} – the effective volumetric modulus; $f(r)$ – function of pore size distribution by radius.

Clay, introduced in small quantities, performs a dual role. On the one hand, its lamellar particles adsorb water and increase the initial volume of the gel phase; on the other hand, during drying, interlayer convergence occurs, accompanied by additional contraction. This contribution can be described as sorption-induced deformation (9):

$$\varepsilon_{cl} = k_{cl} \cdot \Delta w, \quad (9)$$

where Δw – the change in the content of bound water; k_{cl} – the sorption deformation coefficient of clay.

The combined filler forms the structure of the intermediate scale composite and determines the nature of the interphase transition zone. Quartz sand is inert and limits volume reduction due to its mechanical framework, while porous shell limestone is partially involved in moisture exchange and locally enhances capillary effects. The total shrinkage of the filled composite can be approximated by the following model, taking into account the stiffness of the phases (10):

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_m \frac{K_m}{K_m + K_f \phi_f}, \quad (10)$$

where ε_m – the matrix shrinkage; K_m i K_f – the bulk modulus of the matrix and filler; ϕ_f – the volumetric fraction of filler.

An important mechanism is the formation of density fluctuations in the transition zone "binding agent – filler". Here, due to differences in the rate of hydration, carbonization, and drying, local deformation gradients arise, which, when integrated over volume, cause macroscopic contraction and internal stresses. It is these stresses that determine the tendency of the restoration composition to microcracking or, conversely, to relaxation due to the creep of the lime matrix.

The effect of ground shell limestone on the volume changes of hardening lime-cement composites is multicomponent and depends on its dispersibility, porosity, and mechanical compatibility with the lime matrix. On the one hand, the introduction of finely dispersed limestone reduces the effective proportion of the binder phase per unit volume of the composite, which leads to a decrease in chemical and gel shrinkage (11):

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_m (1 - \phi_{lim}), \quad (11)$$

where ϕ_{lim} – volume fraction of ground shell limestone.

On the other hand, the high specific surface area and open porosity of shell limestone particles contribute to moisture redistribution in the system. Some of the water accumulates in the pores of the filler and is gradually released during the hardening process, which reduces moisture gradients and the intensity of capillary shrinkage. This leads to a reduction in maximum capillary stresses. At the same time, the microporous structure of ground shell limestone is partially involved in sorption-type deformations, but these deformations are dispersed and do not form local stress concentrators. At the intermediate scale, shell limestone acts as a "deformation damper", reducing the total internal stresses σ_{red} in the transition zone "binding agent – filler" (12):

$$\sigma_{red} = \sigma_0 \left(1 - \frac{\phi_{lim}}{E_{eff}} \right), \quad (12)$$

where σ_0 – the initial stresses in the matrix; E_{eff} – the effective modulus of the composite, reduced due to the porous filler.

Thus, volumetric deformations of hardening lime-cement restoration composition are the result of the formation of structural aggregates of dispersed particles, chemical shrinkage of hydration and carbonation reactions, capillary shrinkage during water removal, sorption deformations of clay, and structural-mechanical interaction with a combined filler. An adequate description of volumetric

deformations is possible only on the basis of multilevel models of structure formation.

The formation of plastic strength in lime-based plaster restoration composites with a small addition of cement, clay, and combined filler reflects the formation of the internal load-bearing structure of the material in the early stages of hardening. In terms of time, plastic strength characterizes the transition of the system from a viscous-plastic, rheologically active state to a shear-deformation state, in which the ability to perceive and transmit mechanical stresses without loss of integrity is formed.

The main binder in the system is lime, which forms the initial dispersed medium with high water retention capacity and ensures the prolonged plastic state of the composition. In the first hours after mixing, the plastic strength of such mortars is determined mainly by the coagulation structure that arises as a result of physical contacts between particles of calcium hydroxide, clay minerals, and finely dispersed filler components. That is, in the initial stages of hardening, the lime binder forms a dispersed colloidal system. The increase in plastic strength at this stage can be described by a generalized kinetic relationship (13):

$$R_{pl}(t) = R_{pl,0} + A \cdot t^n, \quad (13)$$

where $R_{pl,0}$ – the initial value of plastic strength; A – the structural-kinetic coefficient; $n < 1$ – a parameter that reflects the coagulation nature of structure formation.

The introduction of cement in an amount of 5-15% of the total binder component mass causes the activation of early structure formation processes due to the hydration of clinker minerals, primarily C_3A , and surface hydration of C_3S . The products of these reactions in the early stages are local in nature and do not form a solid rigid framework, but they significantly increase the number and strength of contacts between the solid phases. This manifests itself in an increase in plastic strength already in the first hours of hardening, while maintaining sufficient deformability of the system. Thus, cement in the studied compositions acts as a structure-forming additive that controls the rate of transition of the material from a viscous-plastic to a shear-deformation state.

The introduction of a small amount of cement leads to the formation of local rigid nodes due to early hydration products, which reduce contact reversibility and increase the effective shear modulus of the structure. In this case, plastic strength correlates with an increase in contact density (14):

$$R_{pl} = k \cdot z \cdot f_{cont}, \quad (14)$$

where z – the coordination number of contacts; f_{cont} – the average force of interparticle interaction.

Clay, added in an amount of 5-10% of the binder mass, significantly affects the formation of plastic strength due to its high specific surface area, sorption capacity, and interlayer interactions. Clay particles retain water in an adsorbed state, reduce its migration rate, and contribute to the stabilization of the coagulation structure. This can ensure a smoother and more controlled increase in plastic strength over time, reducing the risk of sudden deformations and local failures in the plastic state. At the same time, excessive clay content can lead to an increase in water demand and a certain slowdown in the formation of a structurally bound framework, which is reflected in a shift of the maximum rate of plastic strength growth to later stages.

Ground shell limestone with a specific surface area of approximately 3000 m²/kg in restoration plaster composites not only acts as an inert filler, but is also an active structure-forming component in the early stages of hardening. Its effect on plastic strength is realized mainly through physical-mechanical and geometric mechanisms, rather than through chemical activity in the classical sense. Due to their high dispersibility and developed surface, ground limestone particles are actively involved in the formation of the coagulation structure of the lime matrix. In the early stages of hardening, they act as centers of adsorption of $Ca(OH)_2$ colloidal particles, contributing to an increase in the density of contacts in the structural network. In simplified terms, the contribution of ground limestone to plastic strength can be described by an increase in the coordination number of contacts (15):

$$R_{pl,lim} = R_{pl,0} + k \cdot \Delta z_{lim} \cdot f_{cont}, \quad (15)$$

where Δz_{lim} – the increase in the number of contacts caused by the presence of dispersed limestone filler.

The porous microstructure of shell limestone ensures partial absorption of free water from the liquid phase, which leads to a local decrease in water content in the interparticle space. This contributes to early compaction of the structure and faster growth of plastic strength without the formation of a rigid

crystalline framework. Thus, the growth of R_{pl} occurs gradually, preserving the rheological "performance" of the mortar, which is fundamentally important for restoration plastering works.

In addition, the chemical affinity of the calcite surface of ground limestone with lime carbonation products reduces the energy heterogeneity of the interphase zone and ensures a smooth transition from a coagulation to a contact-skeleton structure. As a result, plastic strength is formed evenly, without sharp jumps, which reduces the risk of early structural cracking.

Thus, the plastic strength of the studied lime-cement-clay compositions is formed as an integral result of coagulation processes, early cement hydration, sorption properties of clay, and the structure-forming effect of finely dispersed carbonate filler. Its temporal development reflects a gradual increase in the degree of structural cohesion of the material and can be considered as a quantitative indicator of the mortar's readiness to perceive early deformations, which is fundamentally important for the use of such compositions in restoration work on porous limestone bases.

The plastic strength curves can be interpreted as reflecting the scenario of composite structure formation, in which different components do not simply add their properties, but interact, changing the pace and nature of the formation of the load-bearing network. This interpretation allows us to link the experimental plastic strength curves with the composition of the material and the physical content of the structure formation processes.

Based on the results of the experimental research and determination of volumetric changes and plastic strength over time during the hardening of restorative composites, experimental statistical models were obtained in the form of second-order regression equations (16), (17):

$$\Delta V = 0,221 + 0,070x_1 - 0,026x_2 + 0,028x_3 + 0,025x_1x_2 + 0,027x_3^2, \quad (16)$$

$$R_{pl} = 95,2 + 19,9x_1 + 5,5x_2 + 12,4x_3 - 7,6x_1^2 - 4,6x_2^2 - 7,1x_3^2 + 0,9x_1x_2 + 1,9x_1x_3. \quad (17)$$

It should be noted that the fixed values of volumetric changes on which the model is based correspond to the maximum contraction of composite mortars, and the values of plastic strength used in modeling corresponded to 10 hours from the start of hardening. This time interval for determining the fixed value of plastic strength is due to the fact that 10 hours is the moment when plastic shrinkage is almost complete, the structure is already capable of perceiving its own deformations, transferring stress to the base (important for plaster mortar), not collapsing during drying, but the material has not yet become brittle. It is during this period that the "plaster-shell limestone" contact zone is formed, which determines the durability of the restoration system as a whole. In other words, this is the optimal balance between adhesion, deformability, and crack resistance.

The graphical representation of the constructed models is shown in Fig. 3.

The regression models of volumetric deformations and plastic strength obtained reflect different but interrelated aspects of the structure formation process of lime-cement-clay plaster composites.

The volumetric deformation model has a relatively simple structure and is described by linear effects of factors and a limited number of nonlinear terms. A positive coefficient for cement content ($b_1 = +0.070$) indicates that an increase in the cement fraction intensifies the total contraction, which is a physically justified consequence of the chemical shrinkage of hydration products and an increase in capillary stresses in the early stages of hardening. The negative coefficient for clay ($b_2 = -0.026$) indicates its partial compensatory role due to its sorption capacity and increased deformability of the coagulation structure. The positive contribution of ground shell limestone ($b_3 = +0.028$) and the quadratic term $b_{33} > 0$ reflect its participation in moisture exchange and the development of capillary shrinkage due to its porous structure, as well as an increase in shrinkage at high concentrations. The interaction of cement and clay ($b_{12} = +0.025$) confirms that their joint presence leads to a more intensive restructuring of the microstructure than the action of each component separately.

The plastic strength model is nonlinear, which corresponds to the nature of this property as an integral characteristic of the degree of structural cohesion of the material. Positive linear coefficients for cement ($b_1 = +19.9$), clay ($b_2 = +5.5$), and ground shell limestone ($b_3 = +12.4$) indicate their contribution to the formation of the load-bearing coagulation-frame structure. At the same time, negative quadratic terms ($b_{11}, b_{22}, b_{33} < 0$) indicate the presence of composition optimums: an excessive amount of any of the components leads to structural oversaturation, disruption of contacts, or an increase in internal stresses, which limits further growth in plastic strength. Positive cement-

clay and cement-shell limestone interaction coefficients confirm the synergistic nature of these combinations in the formation of early strength.

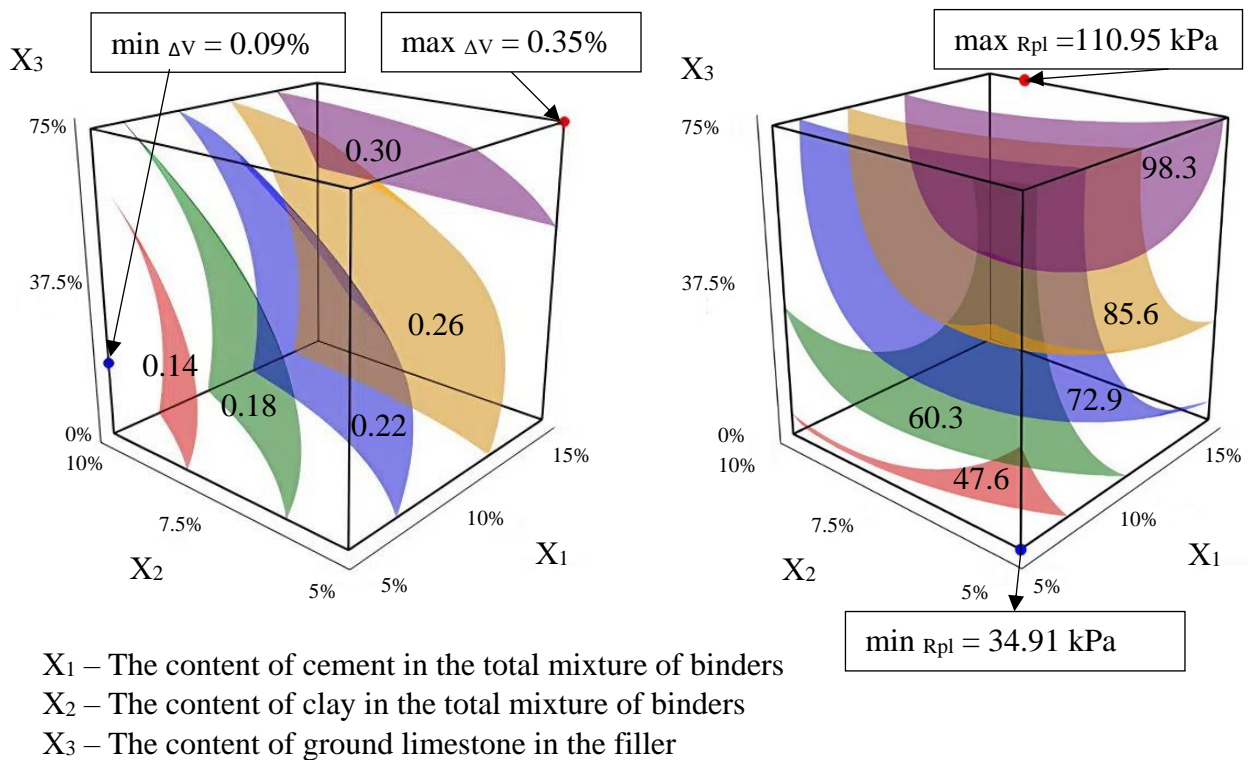


Fig. 3. Isosurfaces of models:

a – volumetric deformations (ΔV , %); b – plastic strength (R_{pl} , kPa)

A qualitative comparison of the two models shows that they describe different aspects of the same process. Volumetric deformations mainly reflect the early restructuring of the pore space and gel phase before the formation of the load-bearing framework, while plastic strength characterizes the ability of the formed structure to resist shear. Therefore, common factors (primarily cement and ground shell limestone) can increase both shrinkage and plastic strength, but not because of a direct causal relationship between these properties, but because of their dependence on the intensity of structure formation.

For mortars of two compositions, graphs of changes in volumetric deformations and increases in plastic strength were constructed (Figs. 4, 5). Mortar No. 3 has a composition (5% cement of the total mass of the binder, 10% clay of the total mass of the binder, quartz sand as a filler without the addition of ground limestone) that corresponds to the minimum contraction. Mortar No. 8 has a composition (15% cement of the total mass of the binder, 10% clay of the total mass of the binder, complex filler – 25% sand and 75% ground limestone), which corresponds to the maximum plastic strength.

The maximum contraction rate is observed within 1–3 hours from the start of hardening, since during this period the system does not yet have a formed load-bearing framework and is in a rheologically active, "living" state. The main deformations develop under conditions of minimal internal resistance of the structure, when volumetric changes are determined by physicochemical processes of water redistribution and compaction of the dispersed system due to the formation of structural aggregates. Capillary or plastic shrinkage, which occurs due to the formation of menisci in macro- and mesopores and the appearance of capillary pressure, plays a significant role at this time. With relatively large pore radii and the absence of a rigid structural grid, capillary pressure is not compensated by the internal resistance of the material, so deformations develop at maximum speed. At the same time, intensive compaction of the coagulation structure occurs: contacts between particles are physical and reversible, particles are easily displaced, and so-called self-packing of the system occurs, leading to a sharp decrease in volume at low values of plastic strength. At the same time, water binding processes begin – surface hydration of cement minerals, sorption and interlayer interactions in clay, dissolution of calcium hydroxide in lime components. However, these processes

do not yet form a single spatially connected framework, but are local and unconnected in nature. It is the combination of intense capillary phenomena, coagulation compaction, the formation of aggregates of dispersed particles, and the absence of a supporting structure that causes the maximum shrinkage rate to occur in the early interval of 1-3 hours of hardening.

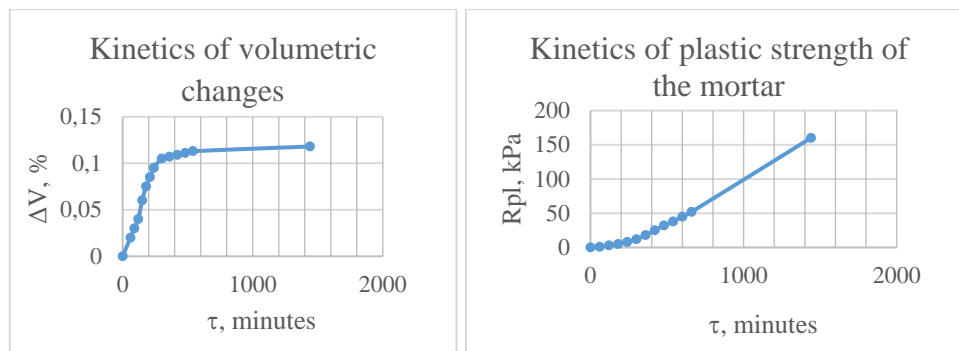


Fig. 4. Kinetics of volume changes and plastic strength of mortar No. 3

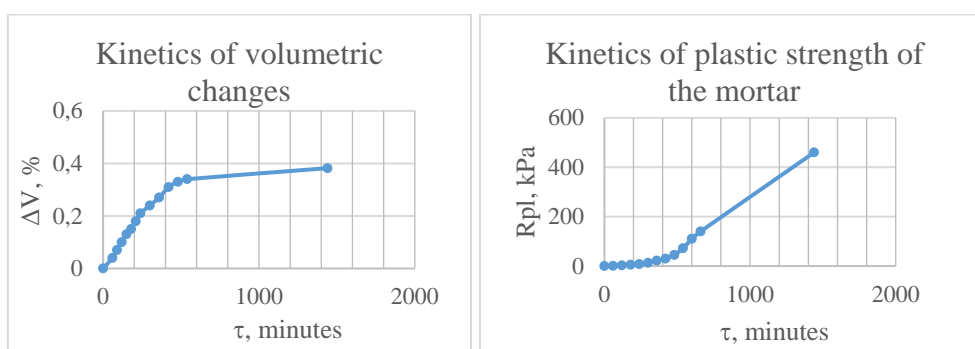


Fig. 5. Kinetics of volume changes and plastic strength of mortar No. 8

The obtained kinetics of plastic strength growth has a characteristic three-stage form, reflecting a sequential transition from a rheologically controlled state to the formation of a spatially bound structural framework. The initial period (up to 2-3 hours) is characterized by low plastic strength values with intense volume changes, while the subsequent increase in R_{pl} is accompanied by stabilization of shrinkage. This confirms the feasibility of using plastic strength as an indicator of early structure formation in lime-cement-clay compositions.

The second period (3–10 hours) is marked by accelerated growth of R_{pl} , indicating a transition from a coagulation structure to a contact-scaffold structure. At this time, the intensity of shrinkage decreases significantly, as the growing internal framework begins to resist capillary stresses. This is a critical period for restoration mortars, as the balance between structural compaction and the ability to relax internal stresses determines the further crack resistance of the material.

The third period (over 10 hours) is characterized by stabilization of R_{pl} growth rates and virtually complete shrinkage. The structure acquires the properties of a frame system with predominantly irreversible contacts, and further strength growth occurs due to chemical processes – cement hydration and slow lime carbonation.

Analysis of the graphs shows that mortar 3 with minimal contraction is characterized by a smoother but slower increase in R_{pl} , while mortar 8 demonstrates more intense early strength with slightly increased shrinkage. This confirms the possibility of purposeful regulation of the balance between deformability and structural cohesion through optimization of the content of cement, clay, and ground shell limestone.

Conclusions. It has been established that volumetric deformations and plastic strength of lime-cement-clay restoration composites are interrelated but not functionally dependent characteristics of the early structure formation process. Maximum contraction of up to 0.35% occurs in the first 24 hours of hardening, with a critical interval of 1-3 hours corresponding to the coagulation state of the system without a formed load-bearing framework. Plastic strength formation occurs in a three-stage

process with a transition to a framework state after 10 hours, which corresponds to the completion of plastic shrinkage. It has been shown that the introduction of ground shell limestone reduces the intensity of volumetric deformations by 15–20% and increases early plastic strength by 1.5–1.8 times due to the compaction of the structure and the formation of additional coagulation contacts. The obtained second-order regression models enable the prediction of volumetric changes and plastic strength of composite materials as a function of composition and facilitate the targeted design of compatible restoration mortars for porous limestone substrates.

References

- [1] DSTU-N B V.3.2-4:2016. Nastanova shchodo vykonannya remontno-restavratsiynykh robit na pam`yatkakh arkhitektury ta mistobuduvannya. K.: Ministerstvo rehional'noho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovoho hospodarstva, 2016.
- [2] *Konservatsiya i restavratsiya ob'`yektiv kul'turnoyi spadshchyny* / za red. I. Prokopenko. Kyiv, Samit-knyha, 2022.
- [3] S.V.Semenova, V.M. Vyrovoy, "Vzayemadaptatsiya materialiv pid chas rekonstruktsiyi ta restavratsiyi", *Ekspluatatsiya ta rekonstruktsiya budivel' ta sporud: tezy dopovidey VI mizhnarodnoyi konferentsiyi*, Odesa: ODABA, 2025. pp. 171-172.
- [4] A.M.S. Loureiro, S.P.A. Paz, M.D.R. Veiga, R.S. Angélica, "Assessment of compatibility between historic mortars and lime-METAKAOLIN restoration mortars made from amazon industrial waste", *Applied Clay Science*, vol. 198, 105843, 2020.
- [5] P. Lopez-Arce et al., "Physico-chemical stone-mortar compatibility of commercial stone-repair mortars of historic buildings from Paris", *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 424-441, 2016.
- [6] V.M. Vyrovoy, V.H. Sukhanov, O.A. Korobko, *Material structure in the structure of the construction* (2nd ed., revised and expanded), Odessa: ODABA. 2022.
- [7] L.Y. Dvorkin, *Teoretychni osnovy budivel'noho materialoznavstva*. Kyiv: Karavela. 2023.
- [8] L.A. Sheynich, *Protsessy samoorganizatsii struktury stroitel'nykh kompozitov* / L.A. Sheynich, Ye.K. Pushkareva. Kyiv, Gamma-print, 2009.
- [9] A.V. Kolesnykov, "Mekhanizmy bahatooseredkovoho strukturoutvorennya budivel'nykh kompozytiv na osnovi hipsu", dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.23.05, Odes'ka derzhavna akademiya budivnictva ta arhitekturi. Odesa, 2025.
- [10] S.V. Semenova, V.M. Vyrovoy, I.M. Dukov, "Kontseptual'ni modeli adaptatsiyi i koadaptatsiyi v budivel'nykh materialakh ta konstruktsiyakh", *Modelyuvannya ta optymizatsiya budivel'nykh kompozytiv: materialy mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi*. Odesa: ODABA, 2025. pp. 16-18.
- [11] V.N. Vyrovoy, I.V. Dovgan', S.V. Semenova, *Osobennosti strukturoobrazovaniya i formirovaniya svoystv polimernykh kompozitsionnykh materialov: monohrafiia*. Odessa: TES, 2004.
- [12] M. Ťažký, L. Bodnárová, L. Ťažká, R. Hela, M. Meruňka, P. Hlaváček, "The Effect of the Composition of a Concrete Mixture on Its Volume Changes", *Materials*, vol. 14, no. 4, 828, 2021.
- [13] O.V. Kondrashchenko, *Budivel'ne materialoznavstvo dlya suchasnoho budivnytstva*. Kharkiv: KHNUMH im. O. M. Beketova. 2019.
- [14] P.V. Kryvenko, R.F. Runova, I.I. Rudenko, *Plastyfikovani betony i rozchyny na osnovi tsementiv systemy Na₂O–CaO–Al₂O₃–SiO₂–H₂O: monohrafiia*. Kyiv: Vydavnytstvo Lira-K, 2022.
- [15] L.K. Mettler, F.K. Wittel, R. J. Flatt, H. J. Herrmann, "Evolution of strength and failure of SCC during early hydration", *Cement and Concrete Research*, vol. 89, pp. 288-296, 2016.
- [16] N.N. Kruglitskiy, *Osnovy fiziko-khimicheskoy mekhaniki*. Kiyev: Vishcha shk., ch.1-3.1975.
- [17] S. Inazumi, K. Tazuke, S. Kashima, "Time-Dependent Rheological Behavior and MPS Simulation of Cement–Bentonite Slurries with Hydration Accelerators for Borehole

- Backfilling Applications", *Journal of Composites Science*, vol. 9, 361, 2025.
- [18] M. Li, P. Yan, J. Han, L. Guo, "Which Is an Appropriate Quadratic Rheological Model of Fresh Paste, the Modified Bingham Model or the Parabolic Model?", *Processes*, vol. 10, 2603, 2022.
- [19] N. Selyutina, Y. Petrov, "Structural–temporal peculiarities of dynamic deformation of layered materials", *Materials*, vol. 15, no 12, 4271. 2022.
- [20] Á. D. Virág., K. Molnár, "Modelling the time-dependent mechanical properties of thermoplastic and thermosetting polymers with Gumbel distribution functions", *Polymer*, vol. 312, 127642, 2024.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ РЕСТАВРАЦІЙНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ВАПНА

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

¹Левицький Д.В., аспірант,
924ldv@odaba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5350-522X

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

Анотація. Експлуатаційні властивості композиційних матеріалів значною мірою обумовлені процесами, що протікають на початку формування їх структури. Об'ємні зміни та пластична міцність розглядаються як інформативні показники, що відображають процеси структуроутворення та адаптації вапняних реставраційних композитів (штукатурних складів) на ранніх стадіях твердіння. Показано, що зазначені характеристики чутливо реагують на перебудову внутрішньої структури матеріалу, зокрема на коагуляцію дисперсних частинок, розвиток міжфазних контактів і формування просторово зв'язаної структури композиту. Обґрунтовано, що об'ємні зміни та пластична міцність відображають різні, але взаємопов'язані аспекти одного процесу – становлення внутрішньої структури композиту, і тому можуть розглядатися як взаємодоповнювальні індикатори структурної еволюції. Узгодженість цих показників визначає здатність реставраційного розчину адаптуватися до деформаційних і вологообмінних особливостей пористої вапнякової основи, що реставрується, без накопичення критичних внутрішніх напружень. На основі експериментальних даних побудовано регресійні моделі та графічні залежності, які наочно відображають вплив складу на характер об'ємних деформацій і кінетику наростання пластичної міцності. Отримані за результатами дослідження ізоповірки та часові криві дозволяють інтерпретувати зміну властивостей через домінування тих чи інших механізмів структуроутворення на різних етапах твердіння. Показано, що варіювання складу композиту дозволяє цілеспрямовано керувати балансом між деформативністю та швидкістю наростання структурної зв'язаності, що є ключовим чинником формування сумісної та стабільної контактної зони. Отримані результати підтверджують можливість використання об'ємних змін і пластичної міцності як методичної основи для прогнозування поведінки реставраційних розчинів, адаптаційних процесів у системі «реставраційний розчин – матеріал основи» та для проектування штукатурних композицій, орієнтованих на довготривалу сумісність і збереження історичних будівель з вапняку-черепашнику.

Ключові слова: реставраційні композити, формування структури, об'ємні деформації, пластична міцність, адаптація, композиційні системи, розчини на основі вапна.

Стаття надійшла до редакції 18.01.2026

Стаття прийнята до друку 21.02.2026

Дата публікації статті 20.03.2026

[This work](#) © 2026 by [Semenova S.V.](#), [Levytskyi D.V.](#) is licensed under CC BY 4.0

СУХІ БУДІВЕЛЬНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ ФОСФОГІПСУ МОДИФІКОВАНОГО ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Шинкевич О.І., аспірант,
oleksiishynkevych@gmail.com, ORCID: 0009-0006-2906-4958
Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. Показано актуальність утилізації фосфогіпсу – відходу хімічної промисловості – шляхом переробки їх у сухі будівельні суміші. Утилізація техногенної сировини створює відповідні можливості для таких важливих аспектів як відчутне зниження фінансових інвестицій у виробничу діяльність підприємств завдяки вже реалізованій первинній діяльності підприємств великої потужності. На базі потужних підприємств розвиваються дочірні підприємства з індивідуальними завданнями, що відрізняються від попередніх, які зазвичай відрізняються впровадженням нових, перспективних, «облегшених» технологій. Використання техногенної сировини забезпечує не тільки фінансову економію, а також знижує витрати на будівництво та обслуговування звалищ. Важливим позитивним аспектом є зменшення екологічного навантаження на атмосферу та водний басейн планети. Тому масова утилізація промислових відходів є загальною проблемою сучасного етапу діяльності будівельних компаній. Різноманітність продуктів із техногенного фосфогіпсу є економічно вигідною. Показано доцільність утилізації фосфогіпсу як високоякісного техногенного продукту, що утворюється в процесі виробництва суперфосфатних сільськогосподарських добрив. Двоводний фосфогіпс в процесі термообробки та модифікації переробляється в модифіковані суміші; розробляється певна послідовність технологічних процесів. Проведено опис процесів та обґрунтовано вибір низькоенергосного технологічного процесу, який забезпечує скорочення енергоспоживання та економію ресурсів. Реалізовано також застосування сухих будівельних сумішей. Показано, що сухі будівельні суміші є наукоємним продуктом високотехнологічних заводських процесів, який дозволяє підвищити якість і темпи ведення дорожніх робіт при зниженні економічної складової цього процесу. Представлено результати експериментальних досліджень щодо застосування фосфогіпсу модифікованого в якості сировини для виготовлення сухих будівельних сумішей для основ дорожнього одягу.

Ключові слова: техногенна сировина, фосфогіпс, сухі будівельні суміші, енергозберігаюча технологія, механічне обладнання для спільного помелу, сушіння та випалу.

Вступ. Сучасна енергетика має гарантувати збереження довкілля, зокрема захист повітряних ресурсів, водних басейнів і контролювати енергозбереження у будівництві. Збереження енергетичних ресурсів є однією з найважливіших проблем енергетичної безпеки в країні. Будівельна галузь України споживає значну кількість енергетичних ресурсів. Будівельний сектор споживає майже 50% природних ресурсів і понад 40% енергії. Енергоспоживання будівельного виробництва в Україні у 2,5-3,5 рази вище, ніж у країнах ЄС. Вдосконалення найсучасніших інноваційних технологій спрямоване на ефективну обробку техногенних відходів, що зменшує енергоспоживання та важку сировину. Розробка та вдосконалення новітніх, ефективних і енергозберігаючих технологій спрямовані на вирішення цієї проблеми, а також на розширення вільних територій від звалищ шляхом раціональної обробки техногенної сировини. Наявність значних обсягів техногенних запасів в Україні дозволяє, враховуючи сучасні матеріали, будинки та технології, вирішувати загальні соціальні, науково-технічні проблеми для отримання екологічно безпечних, економічних і ефективних матеріалів широкого спектра. Наразі у всіх країнах проводиться додаткова обробка матеріалів, які можуть використовуватися як специфічний низькоенергетичний

сировинний матеріал у порівнянні з природною сировиною та сприяють впливу технологічних процесів на якість екологічної екології. Техногенна сировина є дешевшою та менш рідкісною у різних будівельних складах сумішей, матеріалів і продуктів. Водночас кожен тип техногенної сировини відрізняється основними властивостями та сферою застосування відходів, що необхідно враховувати.

Аналіз досліджень та публікацій. Питання практичного використання фосфогіпсу – відходу виробництва фосфорних добрив – для виготовлення будівельних матеріалів нині переросло у загальносвітову проблему, у якій переплітаються інтереси підприємств із виробництва добрив [1], охорони навколишнього середовища [2] та промисловості будівельних матеріалів, зокрема при будівництві автомобільних доріг [3].

Доцільність утилізації фосфогіпсу з його переробкою у будівельні матеріали зумовлена двома основними чинниками:

– необхідністю покращення екологічної ситуації у районах складування відходів, оскільки відбувається забруднення водного й повітряного басейнів, а під відвалами зайняті родючі землі [2];

– необхідністю збереження природних ресурсів гіпсового каменю, оскільки хімічний склад фосфогіпсу близький до природного гіпсу, а обсяги його накопичення співставні із запасами природної сировини [4].

У зв'язку зі збільшенням обсягів цивільного та промислового будівництва та підвищенням вимог до якості оздоблювальних матеріалів широко застосовуються сухі будівельні суміші (СБС) [5].

Застосування таких сумішей зумовлене їх технологічністю та можливістю приготування розчинів безпосередньо на будівельному майданчику [5].

Оскільки в багатьох складах сухих сумішей основним компонентом є напівводний гіпс, переробка фосфогіпсу у гіпсове в'язуче з отриманням СБС є важливим завданням для економіки та екології [1, 4, 6-8]. Щодо отримання сухих сумішей на основі фосфогіпсового в'язучого, то розроблено склади для виготовлення пазогребневих плит, газофосфогіпсобетону, штукатурок, шпаклівок і пресованих виробів .

Термічне перетворення двоводного гіпсу у напівводний здійснюється у зваженому стані. Технологія апробована у напівпромислових умовах ХНУБА та впроваджена корпорацією «Екологія – Дніпро». Для забезпечення стабільності властивостей до складу СБС вводяться модифікуючі добавки [9-12]. Як наповнювач застосовується карбонат кальцію (вапняк), який підвищує тріщиностійкість і пластичність [7]. Гашене вапно $\text{Ca}(\text{OH})_2$ вводиться для зменшення усадкових напружень [8]. Лимонна кислота або Na_2SO_4 застосовуються як сповільнювачі тужавіння [9]. Легкі наповнювачі (перлітовий пісок, трепел) використовуються для полегшення нанесення товстих шарів , але потрібні новітні підходи та нові комплексні підходи . Кварцовий пісок та вапняк застосовуються як заповнювачі для підвищення міцності та зниження вартості матеріалу, але потрібні новітні підходи та нові комплексні підходи та сучасні і низькоенергоємні технології [10-15].

Кварцовий пісок та вапняк застосовуються як заповнювачі для підвищення міцності та зниження вартості матеріалу.

Таким чином, підбір дисперсних наповнювачів і добавок з урахуванням їх мікроструктурної взаємодії дозволяє регулювати технологічні параметри розчинних сумішей.

Метою роботи є оцінка впливу термообробки немодифікованого та модифікованого фосфогіпсу на властивості сухої будівельної суміші для основ дорожніх одягів.

Матеріали та методи досліджень. У якості дрібного заповнювача використовувався пісок кар'єрний Вознесенського (Нікитинського) родовища з модулем крупності 1,25 згідно ДСТУ Б В.2.7-232:2010. Полікарбонатний гіперпластифікатор MelFlux 2651F на основі ефіру полікарбонатових кислот, виробник BASF Construction Solutions (Німеччина), використовувався для СБС у якості водоредукуючої добавки. Мінеральний наповнювач – тонкомелений вапняк, в якості добавки, яка знижує процеси усадки, підвищує тріщиностійкість. Використовувався фракціонований мікрволастоніт (CaSiO_3) MB-05-96, що поставляється «Імпексінвест» м.

Харків; гідрофобізатори композиційні.

Рухливість розчинної суміші визначалася по ДСТУ В.2.7-239:2010. Час життєстійкості суміші – відповідно до ДСТУ В.2.7-185:2009. Щільність суміші визначалася відповідно до ДСТУ Б В.2.7-82:2010. Водостійкість – за стандартною методикою. Визначення міцності на стиск, на розтяг при вигині, водопоглинання визначалось відповідно до ДСТУ Б.В.2.7-82:2010 "Будівельні матеріали. В'язучі гіпсові. Технічні умови", їх фізико-механічні показники, вимоги до сировини, виробництва та контролю якості.

Результати досліджень. Отримання гіпсового в'язучого із фосфогіпсу було здійснено на лабораторній установці, змонтованій спільно кафедрами будівельних матеріалів і виробів та кафедрою механізації будівельних процесів ХНУБА. Дана установка дозволяє здійснювати випал дисперсних матеріалів у зваженому стані. Відмінною особливістю цієї технології є відсутність промивання водою і нейтралізації вихідної сировини – фосфогіпсу. Процес отримання гіпсового в'язучого з техногенних відходів фосфогіпсу за технологією випалу дисперсних матеріалів у зваженому стані (ВДМЗС) має таку послідовність: підготовка для випалу, випал, витримка в камері томління [16-22].

Проведена оцінка і аналіз впливу технологічних особливостей традиційної термообробки фосфогіпсу немодифікованого та модифікованого наповнювача у вигляді кварцового піску. Для приготування сухих сумішей як гіпсового в'язучого було взято напівводний гіпс марки Г-5, отриманий випалом Дніпродзержинського фосфогіпсу за новою технологією. Температура випалу значною мірою сприяє або зростанню міцності або її зниженню, що пов'язано з утворенням у результаті дегідратації сировини кількості напівводного гіпсу й ангідриту, і впливає на міцність одержуваного матеріалу. При цьому подальше нагрівання матеріалу призведе до зневоднення напівводного гіпсу з його перетворенням у розчинний ангідрит і до погіршення його якості, обраний інтервал температур знаходиться в межах від 175 до 400 С. В результаті досліджень було виявлено, що температура випалу впливає на якість одержуваного продукту. Далі експеримент полягає в оцінці температури випалу даного фосфогіпсу, за який він дегідратується в гіпсове в'язуче з максимальними показниками міцності. Графіки диспергування фосфогіпсу та фосфогіпсу модифікованого кварцовим піском наведені на рис. 1.

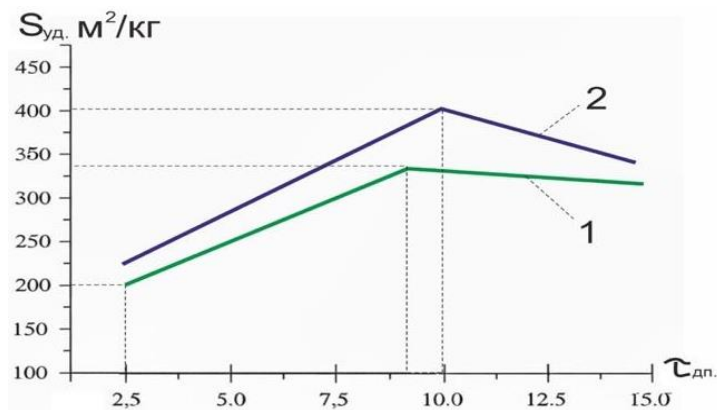


Рис. 1. Вплив тривалості диспергування суміші на величину питомої поверхні фосфогіпсу: 1 – немодифікованого; 2 – модифікованого кварцевим піском

На основі аналізу отриманих даних зроблено такі висновки. По-перше, проведено аналіз підвищення активності матеріалу. Встановлено, що введення наповнювача у вигляді кварцового піску до складу фосфогіпсу (крива 2) забезпечує більш інтенсивне зростання питомої поверхні порівняно з немодифікованим фосфогіпсом (крива 1). Це пояснюється тим, що тверді частинки кварцу виконують роль абразивного компонента, який інтенсифікує подрібнення м'якої гіпсової фази та сприяє утворенню більшої кількості активних поверхонь.

Підвищення активності матеріалу. Введення наповнювача підвищує питому поверхню фосфогіпсу модифікованого із $S = 220$ до $S_{уд.} = 400$ м²/кг протягом 10 хв., а фосфогіпс немодифікований – до $S_{уд.} = 330$ м²/кг протягом 9,0 хв. Далі, величина $S_{уд.}$ починає

зменшуватись до величини $S_{уд}$ 280-300 м²/кг.

Далі присутній ефект агрегації частинок. Подальше збільшення тривалості механічної обробки понад 2-3 хв. призводить далі до зменшення питомої поверхні. Це явище пов'язане з агрегацією надтонких частинок під дією міжмолекулярних та електростатичних сил, унаслідок чого утворюються вторинні агломерати. Таким чином, подальший помел є енергетично та технологічно недоцільним.

Визначення оптимального часу диспергування для обох складів досягаються при тривалості диспергування 10 хвилин, що свідчить про досягнення оптимального ступеня подрібнення. Даний часовий інтервал є технологічно доцільним для отримання найбільш тонкодисперсного та реакційно здатного матеріалу при мінімальних енерговитратах.

Екологічний та ресурсозберігаючий ефект також має значення. Отримана модифікована фосфогіпс-кварцова суміш забезпечує можливість безпечної утилізації промислових відходів фосфогіпсу, переводячи його з екологічно небезпечного стану у стабільний композиційний матеріал. В процесі механічної активації відбувається іммобілізація шкідливих домішок у структурі матеріалу, що знижує їхню міграційну здатність та негативний вплив на довкілля. Модифікований фосфогіпс характеризується підвищеною реакційною здатністю та може бути рекомендований як сировина для виробництва композиційних гіпсових в'язучих, сухих будівельних сумішей та елементів дорожніх основ.

На рис. 2 представлено залежності міцності на стиск (f_{cm}) та міцності на розтяг при вигині (f_{ctfm}) від температури випалу і питомої поверхні матеріалу та впливу мінеральних домішок.

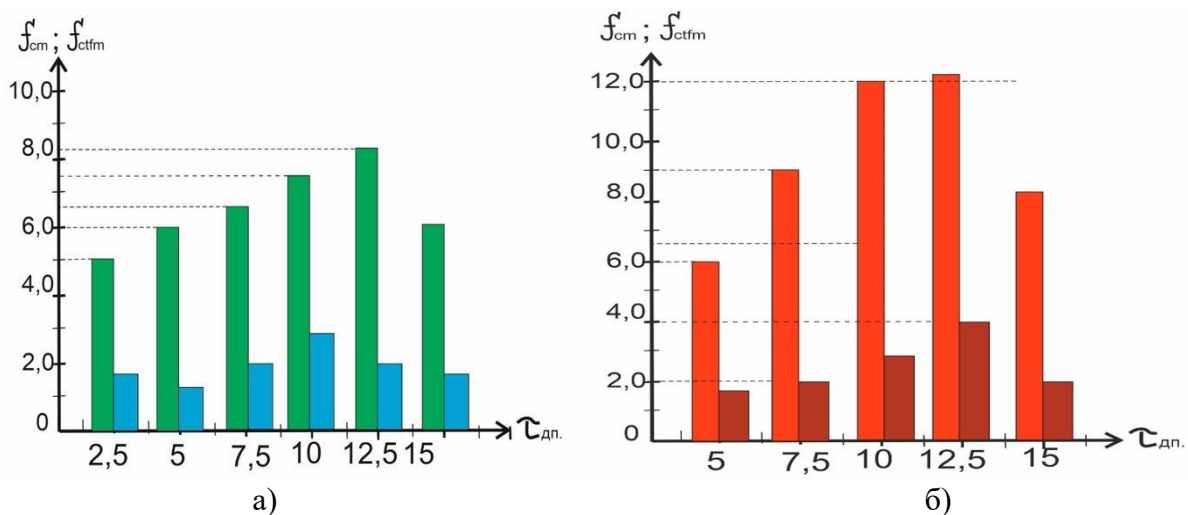


Рис. 2. Вплив тривалості диспергування фосфогіпсу (ФГ) та фосфогіпсу модифікованого кварцовим піском (ФГ+Мод) на показники міцності:

а – f_{cm} ФГ – ■; f_{ctfm} ФГ – ■;
 б – f_{cm} ФГ+Мод – ■; f_{ctfm} ФГ+Мод – ■.

Аналіз результатів показує, що міцність фосфогіпсу неактивованого f_{cm} та f_{ctfm} оптимально збільшується до 8,0 МПа протягом 12,5 хв, а міцність фосфогіпсу модифікованого – до 12,2 МПа, тобто міцність вище в 1,5 - 1,6 разів.

У ході проведеного дослідження встановлено, що спільне диспергування (механічна активація) фосфогіпсу з кварцовим піском є ефективним методом фізико-механічної та частково механохімічної модифікації фосфогіпсової сировини.

Властивості одержаних сухих сумішей представлені в табл. 1. На початковому етапі проведено дослідження щодо впливу параметрів температури на показники якості, отриманих у процесі термообробки сухих будівельних сумішей. При цьому актуальним завданням є тривалість та оптимальна температура термообробки.

Таблиця 1 – Сухі будівельні суміші на гіпсовому в'язучому з немодифікованого фосфогіпсу (1) і модифікованого фосфогіпсу (2)

№ п.п	Найменування сухої будівельної суміші	Відкритий час роботи, с		Границя міцності на стиск, МПа		Границя міцності на розтяг при згині, МПа		Усадка, мм/м		Міцність зчеплення з основою, МПа	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Суміш для основ дорожнього одягу	85	80	6,1	12,7	2,5	3,1	0,2	0,1	0,6	0,78

Додаткові варіанти модифікації фосфогіпсу для будівельної промисловості за напрямами функціоналізації можуть бути такі:

- мінералогічна та фазова модифікація у вигляді карбонізації (CO₂-активація) з утворенням стабільних карбонатних фаз і зниженням розчинності;
- хімічна стабілізація та нейтралізація домішок. Сульфатоалюмінатна активація для створення швидкотверднучих композицій з низькою усадкою;
- композиційне армування: мікроармування волокном для підвищення тріщиностійкості; введення нанодобавок (SiO₂, Al₂O₃) для ущільнення структури та росту міцності;
- функціональні будівельні матеріали: розробка фосфогіпсових дорожніх основ і стабілізованих ґрунтів (з цементом або вапном).

Аналіз даних, наведених у таблиці 1 показує, що властивості сухих сумішей задовольняють сучасним вимогам. Економічні переваги при виробництві таких сумішей полягають у тому, що гіпсове в'язуче отримано з техногенних відходів фосфогіпсу. На наступному етапі дослідження проведено аналіз і дано оцінку впливу комплексної активації компонентів сухої будівельної суміші: полікомпонентного гіперпластифікатора White, який варіювався в інтервалі від 1 до 3 (% м.в.); полікарбонатної гіперпластифікуючої добавки Melflux-2651F, вміст якої варіювався в межах від 1 до 11 (% від м.в.); наповнювач у вигляді кварцового піску із заданою питомою поверхнею – S(1) = 200 см²/г, S(2) = 300 см²/г, S(3) = 400 см²/г (при різній температурі від 170 до 400 °С) за технологією ВДМЗС. Отримані експериментальні результати обґрунтовані методом експериментально-статистичного моделювання [12, 13, 20]. Результати аналізу ЕС-моделей продемонстрували залежність міцності на стиск та розтягу при згині від питомої поверхні матеріалу та органо-мінеральних композицій. Виходячи із діаграм на рис. 3 слід зазначити, що для досягнення максимальних значень міцності необхідно, щоб фосфогіпс модифікований мав питому поверхню в межах 400 см²/г ± 5 см²/г.

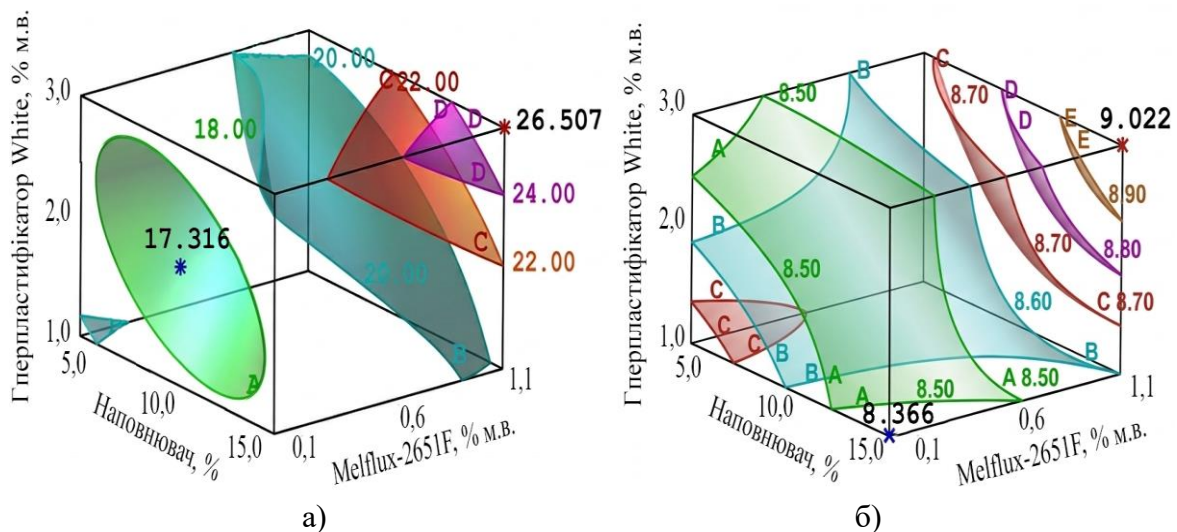


Рис. 3. Міцність на стиск комплексно модифікованої фосфогіпсової сухої будівельної суміші на тонкомеленому піску та органо-мінеральному комплексі:

а – максимальні показники якості; б – мінімальні показники якості при S_{уд}(3)

Результати математичного моделювання комплексно активованих процесів і явищ зведені в таблицю 2.

Таблиця 2 – Спільний вплив комплексних наповнювачів і органо-мінеральних добавок різного призначення на властивості СБС

Назва властивостей СБС	Дисперсність наповнювача у вигляді кварцового піску					
	$S_{уд} = 200 \text{ см}^2/\Gamma$		$S_{уд} = 300 \text{ см}^2/\Gamma$		$S_{уд} = 400 \text{ см}^2/\Gamma$	
Міцність на стиск	Max	Min	Max	Min	Max	Min
		10,2	4,6	15,1	8,3	26,5
Міцність на розтяг при згині	6,8	2,5	8,1	6,7	9,0	8,4

В результаті подальших досліджень встановлено, що розроблені склади будівельної суміші на основі гіпсового в'язучого з комплексом наповнювачів та органо-мінеральних композицій отримані з поліпшеними показниками якості до 3,6 разів. Утворення з'єднань кальциту (CaCO_3) і магнезиту (MgCO_3) в кількості 5%, в фосфогіпсі після випалу має бути позитивним фактором, що впливає на можливість отримання гіпсового в'язучого із фосфогіпсу Г-10 та більше, також позитивно впливає на інші властивості.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Фосфогіпс доцільно розглядати не як відхід, а як багатофункціональну сировину, властивості якої цілеспрямовано налаштовуються під конкретні будівельні задачі – від доріг до промислових будівель і інфраструктури. Застосування комплексного системного підходу для оптимізації рецептур під конкретні експлуатаційні умови підвищує якість матеріалів з фосфогіпсу.

Модифікований фосфогіпс характеризується підвищеною реакційною здатністю та може бути рекомендований як сировина для виробництва композиційних гіпсових в'язучих, сухих будівельних сумішей, стінових матеріалів та елементів дорожнього одягу, наприклад, основ для покриття доріг.

Література

1. Singh M. Phosphogypsum: Potential Applications and Environmental Issues. *Waste Management Journal*. 2018. 24 p.
2. Tayibi H., Choura M., López F. Environmental Impact and Management of Phosphogypsum. *Journal of Environmental Management*. 2009. 18 p.
3. Shen W., Zhou M., Ma W. Use of Phosphogypsum in Road Construction. *Construction and Building Materials*. 2007. 15 p.
4. Круць Т.В. Використання техногенного гіпсу в будівництві. Київ: Будівельник, 2015. 186 с.
5. Пługін А.А. Сухі будівельні суміші на гіпсовій основі. Харків: ХНУБА, 2012. 210с.
6. Глуховський В.Д., Пługін А.А. Технологія переробки фосфогіпсу у в'язучі матеріали. *Вісник ХНУБА*. 2016. 14 с.
7. Neville A.M. Properties of Concrete. Pearson Education. 2011. 872 p.
8. ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Суміші будівельні сухі модифіковані. Загальні технічні умови. Київ. Мінрегіонбуд України. 2010. 59 с.
9. Lea F.M. The Chemistry of Cement and Concrete. 4th ed. 2004. 1092 p.
10. Dvorkin L., Lushnikova N., & Sonebi M. Application areas of phosphogypsum in production of mineral binders and composites based on them: a review of research results. *MATEC Web of Conferences*, vol. 149, 01012, 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814901012>.
11. Дворкін Л.Й., Гавриш О.М., Безусяк О.В., Мироненко А.В., Поліщук-Герасимчук Т.О., Ковалик І.В. Ефективні гіпсові матеріали. За редакцією д.т.н., професора Л.Й. Дворкіна. К: "СПД Павленко", 2013. 240 с.
12. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Марчук В.В., Степасюк Ю.О., Скрипник М.М. Ефективні технології бетонів із застосуванням техногенної сировини: монографія. Рівне : НУВГП, 2017. 424 с.

13. Онищенко А.М., Лантух-Лященко А.І., Мішутін А.В., Снитко В.П., Твардовський І.О., Здольник М.В., Вердіян В.С. Теоретичні та практичні методи оцінювання надійності і довговічності транспортних споруд: монографія. Київ: Видавництво Людмила, 2024. 164 с.
14. Дворкін Л.Й. Добавки для бетонів і розчинів : навчальний посібник. К: Видавництво «Каравела», 2025. 204 с.
15. Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Л. В'язучі речовини: Підручник. К.: Основа, 2012. 448 с.
16. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво [Чинний від 01.04.2016]. Вид. офіц. Київ, 2015. 113 с.
17. Sopov V.P., Vinnichenko V.I., Krot A.Yu., Vitsenko, N.Yu. The effect of the addition of calcium sulfate di-hydrate on the properties of lime-silica binder, *Weimarer Gipstagung*. 2020. p. 633–639.
18. Kostyuk T., Vinnichenko V., Plugin A. Physicochemical studies of the structure of energy-saving compositions based on slags. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 1021:012016, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012016>.
19. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Активация цементных систем как этап получения качественного бетона. URL: <http://m350.ru/articles/more/v/id/93/> (дата звернення: 09.12.2025).
20. V. Vinnichenko, I. Shul'ga, P. Saffiot. Ecological feasibility of pyrolysis in comparison with the incineration of municipal solid waste. *AIP Conference Proceedings*. 2490. 050006. 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0151894>
21. V. Vinnichenko, A. Riazanov. Environmental Problems of Phosphogypsum Utilization. *Key Engineering Materials*. 864. pp. 108-114. 2020. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.864.108>

References

- [1] M. Singh, "Phosphogypsum: Potential Applications and Environmental Issues", *Waste Management Journal*. 2018.
- [2] H. Tayibi, M. Choura, F. López, "Environmental Impact and Management of Phosphogypsum", *Journal of Environmental Management*. 2009.
- [3] W. Shen, M. Zhou, W. Ma, "Use of Phosphogypsum in Road Construction", *Construction and Building Materials*. 2007.
- [4] T.V. Kruts, *Vykorystannia tekhnohennoho hipsu v budivnytstvi*. Kyiv: Budivelnik, 2015.
- [5] A.A. Plugin, *Sukhi budivelni sumishi na hipsovii osnovi*. Kharkiv: KHNUBA, 2012.
- [6] V.D. Glukhovskiy, A.A. Plugin, "Tekhnolohiia pererobky fosfohipsu u viazhuchi materialy", *Visnyk KhNUBA*. 2016.
- [7] A.M. Neville, *Properties of Concrete*. Pearson Education. 2011.
- [8] DSTU B V.2.7-126:2011. Sumishi budivelni sukhi modyfikovani. Zahalni tekhnichni umovy. Kyiv. Minrehionbud Ukrainy. 2010.
- [9] F.M. Lea, *The Chemistry of Cement and Concrete*. 4th ed. 2004.
- [10] L. Dvorkin, N. Lushnikova, & M. Sonebi, "Application areas of phosphogypsum in production of mineral binders and composites based on them: a review of research results", *MATEC Web of Conferences*, vol. 149, 01012, 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814901012>.
- [11] L.Y. Dvorkin, O.M. Havrysh, O.V. Bezusiak, A.V. Myronenko, T.O. Polishchuk-Herasymchuk, I.V. Kovalyk, *Efektivni hipsovi materialy*. Za redaktsiieiu d.t.n., profesora L.Y. Dvorkina. K: "SPD Pavlenko", 2013.
- [12] L.Y. Dvorkin, V.V. Zhytkovskiy, V.V. Marchuk, Yu.O. Stepasiuk, M.M. Skrypnyk, *Efektivni tekhnolohii betoniv iz zastosuvanniam tekhnohennoi syrovyny: monohrafiia*. Rivne : NUVHP, 2017.
- [13] A.M. Onyshchenko, A.I. Lantukh-Liashchenko, A.V. Mishutin, V.P. Snytko, I.O. Tvardovskiy, M.V. Zdolnyk, V.S. Verdiian, *Teoretychni ta praktychni metody otsiniuvannia nadiinosti i dohovichnosti transportnykh sporud: monohrafiia*. Kyiv: Vydavnytstvo Liudmyla, 2024.
- [14] L.Y. Dvorkin, *Dobavky dlia betoniv i rozchyniv : navchalnyi posibnyk*. K: Vydavnytstvo "Karavela", 2025.
- [15] R.F. Runova, L.Y. Dvorkin, O.L. Dvorkin, Yu.L. Nosovskiy, *V'iazhuchi rehovyny: Pidruchnyk*. K.: Osнова, 2012.

- [16] DBN V.2.3-4:2015. Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo. Vyd. ofits. Kyiv, 2015.
- [17] V.P. Sopov, V.I. Vinnichenko, A.Yu. Krot, N.Yu. Vitsen-ko, "The effect of the addition of calcium sulfate di-hydrate on the properties of lime-silica binder", *Weimarer Gipstagung*, pp. 633–639, 2020.
- [18] T. Kostyuk, V. Vinnichenko, A. Plugin, "Physicochemical studies of the structure of energy-sav-ing compositions based on slags", *IOP Confer-ence Series Materials Science and Engineering*, 1021:012016, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012016>.
- [19] L.Y. Dvorkyn, O.L. Dvorkyn, Aktyvatsiia tsementnykh system kak etap polucheniya kachestvennoho betona. [Online]. Available: <http://m350.ru/articles/more/v/id/93/> Accessed on: December 09, 2025.
- [20] V. Vinnichenko, I. Shul'ga, P. Saffiot, "Ecological feasibility of pyrolysis in comparison with the incineration of municipal solid waste", *AIP Conference Proceedings*, 2490, 050006, 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0151894>
- [21] V. Vinnichenko, A. Riazanov, "Environmental Problems of Phosphogypsum Utilization", *Key Engineering Materials*, 864, pp. 108-114, 2020. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.864.108>.

DRY CONSTRUCTION MIXTURES BASED ON PHOSPHOGYPSUM MODIFIED FOR MOTOR ROADS

Shinkevich O.I., postgraduate student,
oleksiishynkevych@gmail.com, ORCID: 0009-0006-2906-4958
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture
4, Didrichsona str., Odesa, 65029, Ukraine

Abstract. The relevance of the disposal of phosphogypsum – an output of the chemical industry – through the route of their processing in dry wastewater is shown. The disposal of technogenic waste creates a unique opportunity for such important aspects as a significant reduction in financial investments in the industrial activity of enterprises. Implementation of the primary activities of enterprises is of great importance. On the basis of existing enterprises, subsidiaries with individual tasks are being developed, which are evolving from the previous ones, which means they are seeing the development of new, promising, "lighter" ones technology. The use of man-made waste will provide not only financial savings, but also reduces costs for housekeeping and housekeeping. An important positive aspect is the change in environmental impact on the atmosphere and water basin of the planet. Therefore, the massive recycling of industrial waste is a key problem at the current stage of activity of industrial companies. The variety of products made from technogenic phosphogypsum is economically viable. The effectiveness of utilization of phosphogypsum as a high-acidity man-made product that is created in the process of production of superphosphate minerals has been shown. During the process of heat treatment and modification, dihydrous phosphogypsum is processed in a modified mixture; the sequence of technological processes is broken down. A description of the processes has been carried out and a low-energy technological process has been selected, which will ensure faster energy consumption and resource savings. The stagnation of dry waste products has also been implemented. It is shown that of dry building mixtures is a scientific product of high-tech factory processes, which allows increasing the intensity and speed of road work while reducing the economical warehouse process. The results of experimental research on the curing of modified phosphogypsum in milk berry for the preparation of dry wake-up bags for the basics of road clothing are presented.

Keywords: technogenic waste, phosphogypsum, dry waste mixtures, energy-saving technology, mechanical equipment for sleeping broom, drying and drying.

Стаття надійшла до редакції 12.01.2026

Стаття прийнята до друку 8.02.2026

Дата публікації статті 20.03.2026

[This work](#) © 2026 by [Шинкевич О.І.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)

АНАЛІЗ ТРИВАЛОСТІ МОНТАЖУ ЗБІРНОГО-МОНОЛІТНОГО КАРКАСУ
МАЛОПОВЕРХОВОГО БУДИНКУ¹Почапський М.Д., аспірант,Pochapskiymd@ukr.net, ORCID: 0009-0008-2974-806X¹Бутнік С.В., к.т.н., доцент,svitlana.butnik@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9737-9421¹Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова
вул. Черноглазівська, 17, м. Харків, 61002, Україна²Помазан М.Д., к.т.н.,zdarovamax@gmail.com, ORCID: 0009-0002-0345-5118²Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Університетська, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна

Анотація. Стаття присвячена аналізу збірно-монолітного будівництва в Україні, яке поєднує переваги збірних та монолітних каркасів при цьому мінімізує їх недоліки. Саме тому збірно-монолітні рішення забезпечують необхідну надійність та економічність сучасного і особливо післявоєнного будівництва. Недостатній досвід зведення збірно-монолітних будівель актуалізує практичну апробацію конструктивних та організаційно-технологічних рішень.

Відповідно мета досліджень полягає в багатоваріантному організаційно-технологічному моделюванні та його порівняння з фактичним процесом зведення експериментального малоповерхового збірно-монолітного будинку.

В дослідженні застосовувались такі методи як аналіз наукових джерел, будівельне організаційно-технологічне моделювання, аналіз нормативної бази витрат праці та машинного часу, спостереження та хронометраж будівельних процесів під час зведення експериментального будинку.

Результати дослідження полягають в наступному. Рекомендується для організаційно-технологічного моделювання зведення збірно-монолітних конструкцій використовувати актуальні нормативи від 2023 року, а за необхідності здійснювати багатоваріантне моделювання на основі нормативної бази за останні 40 років.

Експериментальне будівництво котеджу з розмірами в осях 14×10,5 м (фундаменти стаканного типу, колони перерізом 0,3×0,3 м, перекриття із багатопустотних плит) дозволило виявити виробничі труднощі при зведенні каркасу та порівняти реальні значення тривалості та трудомісткості з нормативними параметрами. Тривалість монтажу цього збірно-монолітного каркасу склала 9, 12 та 24 робочих дні за оптимістичним, реалістичним та песимістичним сценаріями відповідно.

Розраховані поправочні коефіцієнти до нормативних значень для формування сценаріїв монтажу збірно-монолітного каркасу. На можливі форс-мажорні ситуації необхідно передбачити резерви часу в межах 1–4 тижні.

Результати дослідження можуть бути корисними для багатоваріантного організаційно-технологічного моделювання зведення збірно-монолітних будівель різного призначення.

Ключові слова: збірно-монолітний каркас, організаційно-технологічне моделювання, витрати праці.

Вступ. Станом на листопад 2024 року, внаслідок воєнної агресії, сукупні прямі збитки від руйнувань та пошкоджень об'єктів громадського (заклади освіти та охорони здоров'я, культурні та адміністративні будівлі) та житлового секторів складають близько \$16,3 та \$60,0 млрд. відповідно, або 209 тис. – індивідуальних та 27 тис. – багатоквартирних будинків, 0,6 тис. –

гуртожитків. Це залишило без житла близько 3,4 млн осіб [1]. Безперервні бойові дії в 2025 році значно збільшили вказані збитки.

Масштабні пошкодження будівельних об'єктів обумовлюють потребу у їх відновленні, а також актуалізують вимоги щодо підвищення надійності будівель для мінімізації ризику неконтрольованого обвалення. В роботі [2] обґрунтовано актуальність формування моделі відновлення освітньої інфраструктури, що базується на принципах енергоефективності, інноваційності, адаптивності до нових загроз і підвищених вимог до безпеки. А в дослідженні [3] розглянуті конструктивно-технологічні заходи для відновлення будинків шляхом зведення нових конструкцій на місці зруйнованих з використанням прокатних профілів, арматури, монолітного бетону, цегли та газобетонних блоків.

Для вирішення зазначених завдань актуальні збірно-монолітні рішення [4, 5], які забезпечують максимальну заводську та монтажну технологічність, що гарантує мінімальну вартість виготовлення та монтажу конструкцій. Адже в збірно-монолітному каркасі спрощується виготовлення колон за рахунок відмови від консолей як у збірних каркасах, вузли з'єднання конструкцій виконуються відносно просто, як в монолітних каркасах, при цьому в збірно-монолітних рішеннях відсутні опалубні роботи як у збірних каркасах або опалубні роботи виконуються в мінімальних обсягах. Тому збірно-монолітні рішення покликані поєднати переваги збірних та монолітних каркасів при цьому мінімізувавши їх недоліки [6].

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. В роботі [7] наводяться очевидні переваги заводського виготовлення конструкцій: підвищення продуктивності, ефективність контролю якості, зниження витрат, скорочення термінів виконання робіт, суворіший контроль термінів та вартості будівництва, автоматизація. Тому будівництво зі збірного залізобетону забезпечує економію до 20% бетону, 30% сталі, 50% витрат праці порівняно з монолітним будівництвом [8].

В дослідженні [9] запропоноване суттєве скорочення тривалості циклу ліквідації наслідків руйнувань, завдяки прискоренню організаційних і розрахункових процедур. В роботі [10] скорочення тривалості створення будівельного об'єкта досягається за рахунок перерозподілу функцій, встановлення лагів випередження окремих етапів та їх максимального поєднання у часі, ефективних і комплексних організаційно-технологічних рішень. В роботі [11] запропонована модель зведення об'єкта, яка являє собою сукупність погодних умов, методів зведення каркасу і монтажу несучих і огорожуючих конструкцій, сумісних будівельних процесів. В статті [12] наведена модель адаптації управління будівельним проектом у реальному часі. Зазначені моделі потребують апробації на практиці.

В роботі [13] відмічається, що сучасні технології зведення будівель повинні базуватися на раціональному розрізанні збірних конструкцій та ефективних вузлових з'єднаннях, що дозволить застосовувати метод просторової самофіксації, при якому фіксація елементів досягається виключно за рахунок замкових фіксаторів без будь-яких утримуючих пристроїв, але потребують дослідження рішення для усунення сукупних відхилень в монтажному процесі. В статті [14] створена система обґрунтування технологічних параметрів монтажної оснастки для примусових методів монтажу, та звертається увага на те, що конструкція стикових з'єднань суттєво впливає на тривалість монтажного процесу. В дослідженні [15] визначено базу нормативних даних для нормування, яка дозволяє виконувати аналіз процесів при застосуванні різних комплектів оснастки. В роботі [16] з метою підвищення точності монтажу конструкцій за рахунок правильного формування і вибору модулів обмежувачів і фіксаторів для посадки і фіксації конструкцій для збірного будівництва сформовані передумови для експериментів з технологічним оснащенням для орієнтування і фіксації монтованих конструкцій в просторі. Безумовно передові методи просторової самофіксації потребують подальшого вдосконалення та впровадження у будівельну практику.

В роботі [17] наголошується, що потрібно своєчасно виявляти потенційні проблеми, знижувати ризики порушення графіків, підвищувати ефективність управлінських рішень та забезпечувати належний рівень якості будівельних робіт.

В дослідженні [18] протестована модель оцінки термінів монтажу збірних

залізобетонних виробів, що забезпечило прогнозу здатність моделі на рівні 85,26%. Але ця модель не враховує саме збірно-монолітні рішення. Тому доцільно виконати дослідження нормативної та фактичної тривалості зведення збірно-монолітного каркасу.

Постановка мети та завдання. Метою цього дослідження є виявлення можливих ризиків та фактичної тривалості зведення збірно-монолітного каркасу на основі експериментального будівництва одноповерхового котеджу.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні завдання:

–виявити виробничі труднощі при зведенні каркасу та порівняти реальні значення тривалості та трудомісткості з нормативними значеннями;

–виконати варіантне організаційно-технологічне моделювання зведення збірно-монолітного каркасу експериментального житлового одноповерхового будинку за оптимістичним, реалістичним та песимістичним сценаріями;

–на основі зіставлення багатоваріантного організаційно-технологічного моделювання та реальних значень тривалості робіт розрахувати поправочні коефіцієнти до нормативних значень для формування сценаріїв монтажу збірно-монолітного каркасу.

Матеріали та методи дослідження включали: загальнологічні – аналіз, узагальнення, аналогія та абстрагування; емпіричного дослідження – спостереження, експеримент, опис, вимірювання та порівняння; теоретичні – ідеалізація та формалізація.

Основний матеріал і результати. Незважаючи на ефективність збірно-монолітних рішень, вони не мають домінуючого положення на ринку України. Ця ситуація обумовлена відповідною передісторією питання. У радянські часи основний наголос робили на будівлі зі збірного залізобетону в каркасному або панельному варіантах, що гарантувало мінімальну вартість та тривалість будівництва. Після розвалу Радянського Союзу та адаптація до нових умов призвела до відмови від масового панельного будівництва.

Важливо відзначити, що сучасні проекти панельних будівель характеризуються архітектурною виразністю, просторими кухнями та санвузлами, достатньою висотою приміщень. Відповідно, якщо буде потреба у недорогому масовому соціальному житлі, то можливий ренесанс панельного домобудівництва. Підкреслимо саме про можливість ренесансу панельних будинків, так як ще за радянських часів було доведено, що вартість панельного будинку приблизно дорівнює вартості цегляного будинку, але через вищу швидкість будівництва саме панельні будинки і були прийняті як магістральний напрям житлового домобудівництва. Тому на сьогодні вкрай затребувані багатоповерхові цегляні будинки зі збірними перекриттями, адже вартість 1 м² житла у цегляному будинку в 1,5 – 2 рази нижче, ніж у монолітному житловому будинку. І наголосимо, що саме збірні багатопустотні плити забезпечують мінімальну вартість перекриття, що й визначило збереження та модернізацію виробничих потужностей з їх виготовлення, незважаючи на масове закриття ДБК (домобудівних комбінатів).

Таким чином, незначне поширення збірно-монолітних рішень у будівельній практиці України полягає в тому, що невелика потреба у нових соціальних об'єктах (дитсадки, школи тощо) зумовлює низьку потребу у збірних чи монолітних каркасах, а для недорогого житлового будівництва є альтернатива у вигляді цегляних будинків зі збірними перекриттями. Однак, з урахуванням актуалізації підвищених вимог щодо надійності будівель і споруд, внаслідок досвіду бойових дій саме збірно-монолітні рішення дозволять забезпечити необхідну надійність та економічність будівництва. З метою апробації таких рішень було виконано зведення експериментального житлового збірно-монолітного будинку у передмісті Харкова (рис. 1). Будинок прямокутної форми в плані з розмірами в осях 14×10,5 м. Конструктивна схема – рамна. Збірні фундаменти стаканного типу розмірами 2,1×2,1 та 1,7×1,7 м. Збірні колони перерізом 0,3×0,3 м з розривами бетону для замоноличування ригелів. Несучі ригелі перерізом 300×630 мм, ненесучі – 300×530 мм, причому збірна частина перерізами 300×400 та 300×300 мм відповідно. Перекриття – збірні із залізобетонних багатопустотних плит завтовшки 220 мм.



Технологія будівництва **Збірно-монолітно-каркасний будинок**
 Фундамент **Збірний**
 Покрівельний матеріал **ГВЛ мембрана**
 Стінові матеріали **Керамічні блоки**
 Кут нахилу даку **2°**

Площа забудови 161 м²
 Площа будинку 136 м²
 Площа тераси 27,7 м²

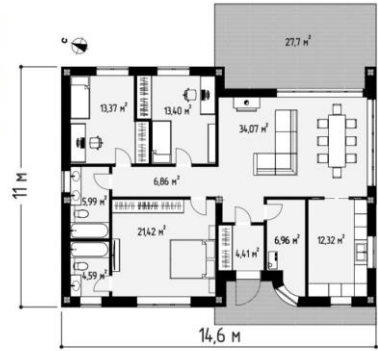


Рис. 1. Ілюстрація зведення експериментального житлового будинку

Як зазначалося у дослідженні [19] для збірно-монолітного будівництва відсутні спеціальні нормативи, а існують норми окремо для збірних та монолітних конструкцій. Крім того, для детальнішого моделювання будівельних процесів використовуються Галузеві норми часу на будівельні, монтажні та ремонтно-будівельні роботи, яких немає для збірних та монолітних конструкцій. При цьому Галузеві норми є актуалізацією ЕНиР (Єдині Норми і Розцінки), затверджених ще в 1986 році, тому статус ЕНиР в Україні на сьогодні не визначено (не актуальний на території України у зв'язку з набуттям чинності ДБН Д.1.1-1-2000 та зміною методики кошторисних розрахунків), оскільки з одного боку він застарів, а з іншого боку немає вітчизняного аналога. Відповідно, рекомендується виконувати організаційно-технологічне моделювання на підставі актуальних норм від 2023 року, а також здійснювати багатоваріантне моделювання з використанням нормативної бази різних років із виявленням оптимістичного, реалістичного, песимістичного сценаріїв виконання окремих робіт та зведення об'єкта загалом.

З урахуванням вищенаведеного, для багатоваріантного організаційно-технологічного моделювання будемо використовувати актуальні Кошторисні норми України Ресурсні елементні кошторисні норми на будівельні роботи Бетонні та залізобетонні конструкції монолітні (Збірник 6) (РЕКНБ) та Бетонні та залізобетонні конструкції збірні (Збірник 7) від 2023 року. А також ЕНиР Збірник Е4 Вип. 1 Будівлі і промислові споруди від 1986 року.

Порівняння фактичної та нормативної трудомісткості наведено в таблиці 1. При чому враховано, що при використанні автокрану норми ЕНиР множились на 1,1 (ТЧ-1) та при облаштуванні опалубки з окремих дошок – на 1,25 (ТЧ-1).

Різниця між нормативними та фактичними показниками представлена у таблиці 2. Як випливає з таблиці 2 фактична трудомісткість і машиномісткість монтажу фундаментів виявилася меншою за нормативну в 4-7 і 3-6 разів відповідно. А для колон – у 2-4 та 1,2-2 рази. Тому роботи з монтажу фундаментів і колон можна нормувати як за ЕНиР так і по РЕКНБ, і отримати запас (резерв) за часом.

Фактична трудомісткість монтажу ригелів і плит перекриття виявилася меншою за нормативну в 1,1-2,4 і 1,5-5,6 разів відповідно. Фактична машиномісткість була меншою за нормативну по РЕКНБ в 1,2 і 1,8 разів для ригелів і плит, але більша за нормативну за ЕНиР в 2,2 і 1,7 разів відповідно. Тому витрати праці з монтажу ригелів і плит перекриття можна нормувати як за ЕНиР так і за РЕКНБ, а машиномісткість нормувати за РЕКНБ.

Фактична трудомісткість опалубних та арматурних робіт виявилася у 2-4,3 та 3,7-9,5 разів більшою порівняно з нормативною. Тому рекомендується нормувати за РЕКНБ та збільшувати витрати у 2 та 4 рази для опалубних та арматурних робіт відповідно.

Фактична трудомісткість бетонних робіт виявилася на 7–21% меншою за нормативну, але машиномісткість була вищою в 1,8-2,6 разів. Тому рекомендується нормувати за РЕКНБ та збільшувати витрати машинного часу у 2 рази.

Отже, більшість робіт, а саме монтаж фундаментів, колон, ригелів, плит перекриття, бетонування, виконувались швидше ніж за нормативними значеннями. Але внаслідок складності проведення опалубних та арматурних робіт вони виконувались довше ніж нормативна тривалість. Саме спрощення опалубних та арматурних робіт дозволить скоротити тривалість зведення каркасу. Застосування незнімної опалубки дозволяє підвищити технологічність опалубних робіт, що зазначається і в роботах [20-23]. Підвищення ефективності арматурних робіт досягається за рахунок проектування відповідного армування верхньої частини ригеля та армування вузлу ригель-колона.

При монтажі каркасу застосовувались тимчасові стійки для ригелів та кондукторів з кутиків для спірання ригелів на колони. В дослідженні [24] розробленні легкі риштування та наведена швидкість монтажу та демонтажу риштувань на 100 м², а саме: традиційні 24 та 16, модульні 12 та 8, мобільні 8 та 6, автоматизовані системи 10 та 7 годин відповідно.

Таблиця 1 – Порівняння фактичної та нормативної трудомісткості монтажу каркасу будинку

№	Найменування	Од. виміру	Норма часу		Обсяг	Склад ланки за ЕНиР	Фактична		Трудомісткість, $\frac{\text{люд-год}}{\text{маш-год}}$			
			ЕНиР РЕКНБ	ЕНиР РЕКНБ			ЕНиР РЕКНБ	Тривалі- сть, год	Кіл. робоч, люд	факт	норма	
											ЕНиР	РЕКНБ
1	Установка фундаменту	1 елем	1,76	0,583	6	монт 4р-1, 3р-1, 2р-1; маш 6р-1	2	2	4	17,16	28,8	
		100 шт	278,4	123,54						2,2	0,737	5,71
2	Установка колон	1 кол	2,42	0,605	9	монт 5р-1, 4р-1, 3р-1, 2р-1; маш 6р-1	4,5	3	13,5	21,78	54,03	
		100 шт	600,3	105,71						7,29	9,52	
	Бетонування стиків	1 стик	0,81		9	монт 4р-1, 3р-1				7,29		
3	Установка ригелів	1 ел	1,54	0,308	24	монт 5р-1, 4р-1, 3р-2, 2р-1; маш 6р-1	6	2	33	36,96	77,95	
		100 шт	324,8	85,49						10,5	7,39	20,52
4	Укладка плит	1 ел	0,792	0,198	40	монт 4р-1, 3р-2, 2р-1; маш 6р-1	6,5	2	27	31,68	151,96	
		100 шт	379,9	60,55						7	7,92	24,22
	Бетонування швів	100 м	6,4		1,68	монт 4р-1, 3р-1				10,75		
5	Збирання та розбирання бокової опалубки перекрыття	1 м ²	0,475		22,1	тесляр 4р- 1, 2р-1. Розборка: тесляр 3р- 1, 2р-1	8	3	66	10,5	32,26	
		100 м ³	488,72	9,89						0,066		8
6	Армування ригелів	1 т	22,5		0,076	арматурник 5р-1, 2р-1	40	3	240	25,08	65,35	
			18,5		0,265							
			14		0,571							
			10		1,047							
			33,36	0,39								
7	Бетонування ригелів	1 м ³	1,4		11,74	бетоняр 4р-1, 2р-1	2,5	3	16,5	21	17,63	
		100 м ³	150,13	25,87						3	2,16	3,04
	Подача бетону	1 м ³	0,388	0,184		такел 2р-2, маш 6р-1						

Таблиця 2 – Різниця між нормативними та фактичними (прийнято за 100%) значеннями трудомісткості та машиноємності зведення збірно-монолітного каркасу малоповерхового будинку

№	Найменування	Обсяг	Трудомісткість, %			Машиноємність, %		
			факт	норма		факт	норма	
				ЕНиР	РЕКНБ		ЕНиР	РЕКНБ
1	Фундамент	9 шт	100	429	720	100	285	655
2	Колони	9 шт		215	400		121	211
3	Ригелі	24 шт		112	236		45	124
4	Плити	40 шт		157	563		59	179
5	Опалубка	22 м ²		23	49		-	-
6	Армування	2 т		10,5	27		-	-
7	Бетонування	12 м ³		127	107		39	55

На підставі даних таблиць 1 та 2 сформуємо оптимістичний, реалістичний та песимістичний сценарії монтажу збірно-монолітного каркасу будинку при виконанні робіт в одну зміну (таблиця 3).

Таблиця 3 – Оптимістичний (о), реалістичний (р), песимістичний (п) сценарії монтажу каркасу будинку

№	Найменування	Сценарій	Обсяг	Труд., люд-зм	Маш., маш-зм	Кільк. роб, люд	Тривалість, дні	Питома вага, %	Найімовірніша тривалість, дні
1	Монтаж стовп. фундам.	о	9 шт	0,5	0,25	2	0,25	3	1
		р		2,25	0,75	3	0,75	6	
		п		5	1,65	4	1,25	5	
2	Монтаж колон	о	9 шт	1,8	0,6	3	0,6	6	1
		р		3,6	0,7	4	0,9	8	
		п		10,2	1,2	6	1,7	7	
3	Монтаж ригелів	о	24 шт	4	2	2	2	22	2
		р		5	1	5	1	8	
		п		14	2,6	7	2	8	
4	Монтаж плит перекр.	о	40 шт	3,4	1,7	2	1,7	18	2
		р		5,2	1	4	1,3	11	
		п		28,2	3	6	4,7	20	
5	Опалубні роботи	о	22 м ²	2	0,1	2	1	11	2
		р		8,25	0,1	3	2,75	23	
		п		12	0,1	4	3	13	
6	Армування ригелів	о	2 т	6	0,1	2	3	32	4
		р		16	0,1	4	4	33	
		п		30	0,1	3	10	42	
7	Бетонування ригелів	о	12 м ³	2,1	0,3	3	0,7	8	2
		р		2,6	0,3	2	1,3	11	
		п		4,4	0,4	4	1,1	5	
Загалом монтаж каркасу		о	300 м ²	20	5		9	100 %	14
		р		43	4		12		
		п		104	9		24		

Як впливає з таблиці 3 тривалість монтажу збірно-монолітного каркасу експериментального житлового одноповерхового будинку склала 9, 12 та 24 робочих днів за оптимістичним, реалістичним та песимістичним сценаріями відповідно. Виходить, що при виконанні робіт у дві зміни одноповерховий будинок площею 150 м² можна змонтувати за один-два тижні, що збігається з даними інших дослідників, так, наприклад, в роботі [13] зазначається, що коробка будинку площею 100 м² зведена протягом 10 днів бригадою із 4-х осіб. Проте, каркас експериментального будинку з низки виробничих труднощів, фактично змонтували за 7 тижнів, тобто на два тижні довше, ніж за песимістичним сценарієм.

Також потрібно враховувати, що в умовах військового стану потрібно створювати безпечні умови для працівників на будівельних майданчиках, шляхом переобладнання наявних ліфтових шахт, підземних приміщень та інших частин будівель на безпечні укриття [25]. Крім цього, можливі відхилення фактичної тривалості будівництва, які обумовлені іншими факторами, наприклад, простоями робітників у 5%, змінами проекту в процесі виконання робіт у 24%, порушеннями технології виконання робіт у 2%, низьким рівнем організації праці та виробництва у 16%, невиправданої концентрацією трудових ресурсів у 17%, хворобою робітників та виробничим травматизмом у 3%, прогулами та відпустками у 5%, простоями фронту робіт у 28% випадках збільшували проекту тривалість будівництва [26].

З урахуванням вищевикладеного знайдені поправочні коефіцієнти до нормативних значень для формування сценаріїв монтажу збірно-монолітного каркасу (таблиця 4). Аналіз факторів, які впливають на відхилення фактичних значень трудомісткості та машиновитрат зведення збірно-монолітного каркасу від нормативних параметрів наведено в таблиці 5.

Таблиця 4 – Поправочні коефіцієнти до нормативних значень для формування сценаріїв монтажу збірно-монолітного каркасу

№	Найменування робіт	Норми до трудовитрат	Поправочні коефіцієнти до		Норми до маш-витрат	
			трудоуитрат	маш-витрат		
1	Монтаж фундаментів	ЕНиР та РЕКНБ	0,15 – 1	0,17 – 1	ЕНиР та РЕКНБ	
2	Монтаж колон		0,25 – 1	0,5 – 1		
3	Монтаж ригелів	ЕНиР та РЕКНБ	0,42 – 1	0,8 – 1	РЕКНБ	
4	Монтаж плит		0,18 – 1	0,56 – 1		
5	Опалубні роботи	РЕКНБ	1 – 4,3	1 – 2		
6	Арматурні роботи		1 – 10	1 – 4		
7	Бетонування ригелів		0,8 – 1	1 – 2		
Витрати часу на форс-мажорні ситуації			В залежності від особливостей об'єкту, але не менше одного тижня			

Таблиця 5 – Аналіз відхилення фактичних витрат праці та машиновитрат зведення збірно-монолітного каркасу від нормативних параметрів

№	Фактори відхилення		Найменування робіт	Фактори відхилення	
	трудоємкості	коєф. за табл. 4		коєф. за табл. 4	машиновитрат
1	2 монт. замість 3	0,15 – 1	Монтаж фундаментів	0,17 – 1	сучасні крани та резерви часу у нормах
2	3 монтажника	0,25 – 1	Монтаж колон	0,5 – 1	
3	замість 5	0,42 – 1	Монтаж ригелів	0,8 – 1	
4	3 монт. замість 4	0,18 – 1	Монтаж плит	0,56 – 1	
5	складність рішень	1 – 4,3	Опалубні роботи	1 – 2	складність рішень
6		1 – 10	Арматурні роботи	1 – 4	
7	сучасне обладнання	0,8 – 1	Бетонування ригелів	1 – 2	незручність ущільнення

Таким чином, для будівництва пілотних збірно-монолітних об'єктів рекомендується для організаційно-технологічного моделювання використовувати чинні Кошторисні норми України, Ресурсні елементні кошторисні норми на будівельні роботи, Бетонні та залізобетонні конструкції монолітні (Збірник 6) (РЕКНБ) та Бетонні та залізобетонні конструкції збірні (Збірник 7) від 2023 року. Крім того, для опалубних та арматурних робіт слід враховувати можливе збільшення тривалості внаслідок складності армування верхньої частини ригелів та труднощів опалубних робіт. Також можливі пошкодження збірних конструкцій, помилки у виконанні робіт та інші форс-мажорні ситуації, на які також необхідно передбачити резерви часу не менше одного тижня. Разом з цим є можливість виконання робіт меншою кількістю робітників. У міру дедалі більшого впровадження подібних рішень, збільшення досвіду, підвищення технологічності, тривалість будівництва об'єктів буде мінімізована.

Висновки:

1. При зведенні експериментального будинку виявлені виробничі проблеми зокрема пов'язані зі складністю опалубних, арматурних та бетонних робіт. Рекомендації з вирішення цих проблем полягають головним чином у підвищенні технологічності вузлів, наприклад, у спрощенні армування та виготовлення ригелів, які не потребують встановлення бічної опалубки. Порівняння реальних значень тривалості та трудомісткості з актуальними нормативними параметрами від 2023 року показало що зведення експериментального будинку виконувались швидше ніж за нормою, за винятком опалубних та арматурних робіт.

2. На підставі варіантного організаційно-технологічного моделювання, тривалість монтажу збірно-монолітного каркасу експериментального житлового одноповерхового будинку склала 9, 12 та 24 робочих днів за оптимістичним, реалістичним та песимістичним сценаріями відповідно. Проте, з низки виробничих труднощів, фактично каркас змонтували за 7 тижнів,

тобто на два тижні довше, ніж за песимістичним сценарієм.

3. Зі зіставлення багатоваріантного організаційно-технологічного моделювання та реальних значень тривалості робіт розраховані поправочні коефіцієнти до нормативних значень для формування сценаріїв монтажу збірно-монолітного каркасу. Для опалубних та арматурних робіт слід враховувати можливе збільшення тривалості внаслідок складності армування верхньої частини ригелів. Також можливі помилки у виконанні робіт та інші форс-мажорні ситуації, на які необхідно передбачити резерви часу.

Література

1. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії росії проти України станом на листопад 2024 року. 2025, С. 1-28. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf. (дата звернення: 24.11.2025).
2. Atynian A.O., Savchenko O.I., Kamchatna S.M., Rybachuk O.V., Nazarko O.O. Technology of educational institutions' reconstruction after destruction caused by armed conflict on the territory of Ukraine rigidity. *Modern construction and architecture*. 2025. № 13. pp. 125-132. doi.org/10.31650/2786-6696-2025-13-125-132.
3. Aleynikova A., Hulievskiy P., Orobei V. Methods of renovation of multi-story residential buildings in modern Ukraine. *Modern construction and architecture*. 2024. № 8. pp. 102-109. doi.org/10.31650/2786-6696-2024-8-102-109.
4. Почапський М.Д., Бутнік С.В., Помазан М.Д. Перспективи збірно-монолітного будівництва для відновлення об'єктів в Україні. *Будівельне виробництво*. 2022. №74. С. 35-41. doi.org/10.36750/2524-2555.74.35-41.
5. Почапський М.Д. Доцільність використання збірно-монолітних рішень в будівництві. *Науковий вісник будівництва*. 2025. № 112. С. 241-247. doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.29.
6. Інноваційні технології каркасного будівництва. навч. посібник / Г.М. Тонкачєєв та ін., К. Ліра-К, 2024. 316 с.
7. Rocha P.F., Ferreira N.O., Pimenta F., Pereira N.B. Impacts of Prefabrication in the Building Construction Industry. *Encyclopedia*. 2023. №3. pp. 28-45. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010003>.
8. V. Raghavendra K. Holla, Siddhant Anant, Muzzammil Ali Mohammad, Aakash Periwal, Aakash Kapoor. Time, Cost, Productivity and Quality analysis of Precast Concrete System. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. 2016. №3. pp. 252-257.
9. Божинський М.О. Реалізація модулів інформаційно-математичної системи оптимізації підсилення з інтеграцією існуючих баз даних для прискорення прийняття організаційно-технологічних рішень з ліквідації наслідків, спричинених впливами, не передбаченими при проектуванні. *Будівельне виробництво*. 2024. №78. С.132-139.
10. Шутенко Л.Н., Торкатюк В.И., Золотова Н.М., Виноградская О.М., Радван Осама, Белаш Ю.В., Ключко Е.В., Степаненко С.А., Железнякова И.А., Кулик В.Т., Денисенко А.П., Бутник С.В. Организационно-технологические и технические особенности сокращения продолжительности возведения зданий и сооружений из монолитного бетона и железобетона. *Коммунальное хозяйство городов*. 2004. №60. С. 3-28.
11. Черненко К.В. Загальні засади технологій та методів зведення багатопверхових будівель і їх класифікація. *Містобудування та територіальне планування*. 2015. Вип. 57. С. 468-475.
12. Горда О.В., Бондарчук К.С. Визначення ресурсу адаптації виконання етапу будівельного проекту. *Управління розвитком складних систем*. 2013. Вип. 14. С.100-104.
13. Лепська Л.А., Тонкачєєв Г.М., Шандра О.Г. Підвищення технологічності монтажу каркасних будівель: передові методи. *Містобудування та територіальне планування*. 2024. Вип. 85. С. 315-339. doi.org/10.32347/2076-815X.2024.85.315-339.
14. Тонкачєєв Г.М., Лепська Л.А., Шарапа С.П. Система обґрунтування технологічних параметрів монтажної оснастки для обмеження та фіксації конструкцій, що монтуються. *Містобудування та територіальне планування*. 2014. Вип. 52. С. 418-426.
15. Тонкачєєв Г.М. Нова система нормування витрат часу для прийняття технологічних рішень. *Містобудування та територіальне планування*. 2013. Вип. 50. С. 700-704.

16. Тонкачєєв Г.М., Лєпська Л.А. Дослідження фіксаторів для монтажу збірних будівельних конструкцій. *Містобудування та територіальне планування*. 2013. Вип. 48. С. 457-462.
17. Пахомов М.В., Заяць Є.І. Аналіз організації контролю якості будівельних робіт у каркасно-монолітному будівництві. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 4 (028). С.127-137. doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270425.127.1183.
18. Ali Najafi, Robert Tiong Lee Kong. Productivity modeling of precast concrete installation using multiple regression analysis. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol.10, no. 6. pp. 2496 – 2503.
19. Бутнік С.В., Почапський М.Д. Аналіз нормативної трудомісткості зведення збірно-монолітних конструкцій. *Комунальне господарство міст*. 2025. №189. С. 258-265. doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-258-265.
20. Дікарев К.Б., Мовчан О.Ю., Куценко-Скокова А.О., Сопільняк А.М., Папірник Р.Б. Дослідження застосування незнімної опалубки для скорочення термінів будівництва малоповерхових будівель та споруд. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 3 (027). С. 50-59. doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270425.50.1160.
21. Шумаков И.В., Юнис Башир, Ассаад Мустафа. Технологическое обоснование перспектив каркасно-монолитного строительства Ливана. *Науковий вісник будівництва*. 2016. №83(1). С. 52-57.
22. Meneulyuk 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. pp. 113-122. doi.org/10.31650/2786-6696-2022-2-113-122.
23. Руссий В.В., Бочевар К.І. Моделювання показників ефективності зведення житлового комплексу «Авіньйон». *Modern construction and architecture*. 2023. №6. С. 123-132. doi.org/10.31650/2786-6696-2023-6-123-132.
24. Дікарев К.Б., Папірник Р.Б., Коваль В.М., Коваль В.В. Актуальність використання сучасних технологій у монолітному будівництві. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 5 (023). С. 77-84. doi.org/10.30838/UJCEA.2312.301024.77.1095.
25. Папірник Р.Б., Дікарев К.Б., Селецький В.В., Коваль В.В. Упровадження інноваційних технологій виконання будівельно-монтажних робіт в особливих умовах. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 5(023). С. 124-132. doi.org/10.30838/UJCEA.2312.301024.124.1101.
26. Шатрова І.А., Демидова О.О. Досвід і наукові дослідження з обґрунтування тривалості виконання робіт у будівництві. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2020. Вип. 45. С. 71-79.

References

- [1] Zvit pro priami zbytky infrastruktury vid ruinovan vnaslidok viiskovoi ahresii rosii proty Ukrainy stanom na lystopad 2024 roku. 2025, s. 1-28. [Online]. Available: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf. Accessed on: November 24, 2025.
- [2] A.O. Atynian, O.I. Savchenko, S.M. Kamchatna, O.V. Rybachuk, O.O. Nazarko, "Technology of educational institutions' reconstruction after destruction caused by armed conflict on the territory of Ukraine rigidity", *Modern construction and architecture*, no. 13, pp. 125-132, 2025. doi.org/10.31650/2786-6696-2025-13-125-132.
- [3] A. Aleynikova, P. Hulievskiy, V. Orobei, "Methods of renovation of multi-story residential buildings in modern Ukraine", *Modern construction and architecture*, no. 8, pp. 102-109, 2024. doi.org/10.31650/2786-6696-2024-8-102-109.
- [4] M.D. Pochapskij, S.V. Butnik, M.D. Pomazan, "Perspektivi zbirno-monolitnogo budivnictva dlya vidnovlennya ob'ektiv v Ukrayini", *Budivnele virobnictvo*, no. 74, pp. 35-41, 2022. doi.org/10.36750/2524-2555.74.35-41.
- [5] M.D. Pochapskij, "Docilnist vikoristannya zbirno-monolitnih rishen v budivnictvi", *Naukovij visnik budivnictva*, no. 112, pp. 241-247, 2025. doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.29.
- [6] Н.М. Тонкачєєв та ін. *Innovatsiini tekhnolohii karkasnoho budivnytstva: navch.*

- Posibnyk. K. Lira-K, 2024.
- [7] P.F. Rocha, N.O. Ferreira, F. Pimenta, N.B. Pereira, "Impacts of Prefabrication in the Building Construction Industry", *Encyclopedia*, no. 3, pp. 28–45, 2023. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010003>
- [8] B. Raghavendra K. Holla, Siddhant Anant, Muzzammil Ali Mohammad, Aakash Periwal, Aakash Kapoor, "Time, Cost, Productivity and Quality analysis of Precast Concrete System", *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, vol. 3, pp. 252-257, 2016.
- [9] M.O. Bozhinskij, "Realizaciya moduliv informacijno-matematichnoyi sistemi optimizaciyi pidsilennya z integraciyeyu isnuvuchih baz danih dlya priskorennya prijnyattya organizacijno-tehnologichnih rishen z likvidaciyi naslidkiv, sprichinenih vplivami, ne peredbachenimi pri proektuvanni", *Budivelne virobnictvo*, no.78. pp.132-139, 2024.
- [10] L.N. Shutenko, V.I. Torkatyuk, N.M. Zolotova, O.M. Vinogradskaya, Radvan Osama, Yu.V. Belash, E.V. Klochko, S.A. Stepanenko, I.A. Zheleznyakova, V.T. Kulik, A.P. Denisenko, S.V. Butnik, "Organizacionno-tehnologicheskie i tehnichekie osobennosti sokrasheniya prodolzhitelnosti vozvedeniya zdanij i sooruzhenij iz monolitnogo betona i zhelezobetona", *Kommunalnoe hozyajstvo gorodov*, no. 60, pp. 3-28, 2004.
- [11] K.V. Chernenko, "Zagalni zasadi tehnologij ta metodiv zvedennya bagatopoverhovih budivel i yih klasifikaciya", *Mistobuduvannya ta teritorialne planuvannya*, vol. 57, pp. 468-475, 2015.
- [12] O.V. Gorda, K.S. Bondarchuk, "Viznachennya resursu adaptaciyi vikonannya etapu budivelnogo proektu", *Upravlinnya rozvitkom skladnih sistem*, vol. 14, pp.100-104, 2013.
- [13] L.A. Lepska, G.M. Tonkachejev, O.G. Shandra, "Pidvishennya tehnologichnosti montazhu karkasnih budivel: peredovi metodi", *Mistobuduvannya ta teritorialne planuvannya*, vol. 85, pp. 315-339, 2024. doi.org/10.32347/2076-815X.2024.85.315-339.
- [14] G.M. Tonkachejev, L.A. Lepska, S.P. Sharapa, "Sistema obgruntuvannya tehnologichnih parametriv montazhnoyi osnastki dlya obmezheniya ta fiksaciyi konstrukcij, sho montuyutsya", *Mistobuduvannya ta teritorialne planuvannya*, vol. 52, pp. 418-426, 2014.
- [15] G.M. Tonkachejev, "Nova sistema normuvannya vitrat chasu dlya prijnyattya tehnologichnih rishen", *Mistobuduvannya ta teritorialne planuvannya*, vol. 50, pp. 700-704, 2013.
- [16] G.M. Tonkachejev, L.A. Lepska, "Doslidzhennya fiksatoriv dlya montazhu zbirnih budivelnih konstrukcij", *Mistobuduvannya ta teritorialne planuvannya*, vol. 48, pp. 457-462, 2013.
- [17] M.V. Pahomov, Ye.I. Zayac, "Analiz organizaciyi kontrolyu yakosti budivelnih robit u karkasno-monolitnomu budivnictvi", *Ukrayinskij zhurnal budivnictva ta arhitekturi*, no. 4 (028), pp.127-137, 2025. doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270425.127.1183.
- [18] Ali Najafi, Robert Tiong Lee Kong, "Productivity modeling of precast concrete installation using multiple regression analysis", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 6, pp. 2496-2503, 2015.
- [19] S.V. Butnik, M.D. Pochapskij, "Analiz normativnoyi trudomistkosti zvedennya zbirno-monolitnih konstrukcij", *Komunalne gospodarstvo mist*, no. 189, 2025. doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-258-265.
- [20] K.B. Dikarev, O.Yu. Movchan, A.O. Kucenko-Skokova, A.M. Sopilnyak, R.B. Papirnik, "Doslidzhennya zastosuvannya neznimnoyi opalubki dlya skorochennya terminiv budivnictva malopoverhovih budivel ta sporud", *Ukrayinskij zhurnal budivnictva ta arhitekturi*, no. 3 (027), pp. 50-59, 2025. doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270425.50.1160.
- [21] I.V. Shumakov, Yunis Bashir, Assaad Mustafa, "Tehnologicheskoe obosnovanie perspektiv karkasno-monolitnogo stroitelstva Livana", *Naukovij visnik budivnictva*, no. 83(1), pp. 52-57, 2016.
- [22] O.I. Menelyuk, S.V. Kyrlyuk, K.I. 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. doi.org/10.31650/2786-6696-2022-2-113-122.
- [23] V.V. Russij, K.I. Bochevar, "Modelyuvannya pokaznikov efektyvnosti zvedennya zhitlovogo kompleksu «Avinjon»", *Modern construction and architecture*, no. 6, pp. 123-132, 2023. doi.org/10.31650/2786-6696-2023-6-123-132.

- [24] K.B. Dikarev, R.B. Papirnik, V.M. Koval, V.V. Koval, "Aktualnist vikoristannya suchasni tehnologij u monolitnomu budivnictvi", *Ukrayinskij zhurnal budivnictva ta arhitekturi*, no. 5 (023), 2024. doi.org/10.30838/UJCEA.2312.301024.77.1095.
- [25] R.B. Papirnik, K.B. Dikarev, V.V. Seleckij, V.V. Koval, "Uprovadzhennya innovacijnih tehnologij vikonannya budivelno-montazhni robot v osoblivih umovah", *Ukrayinskij zhurnal budivnictva ta arhitekturi*, no. 5 (023), 2024. doi.org/10.30838/UJCEA.2312.301024.124.1101.
- [26] I.A. Shatrova, O.O. Demidova, "Dosvid i naukovi doslidzhennya z obruntuvannya trivalosti vikonannya robot u budivnictvi", *Shlyahi pidvishennya efektivnosti budivnictva v umovah formuvannya rinkovih vidnosin*, vol. 45, pp. 71-79, 2020.

ANALYSIS OF THE ASSEMBLY DURATION OF A PRECAST-MONOLITHIC FRAME FOR A LOW-RISE BUILDING

¹**Pochapskiy A.O.**, postgraduate student,

Pochapskiydm@ukr.net, ORCID: 0009-0008-2974-806X

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

svitlana.butnik@kname.edu.ua, ORCID: 0009-0005-6667-6869

¹*O.M. Beketov National University of Urban Economy*

17, Chernoglazivska str., Kharkiv, 61002, Ukraine

²**Pomazan M.D.**, PhD,

zdarovamax@gmail.com, ORCID: 0009-0002-0345-5118

²*National University "Zaporizhzhia Polytechnic"*

64, Universytetska St., Zaporizhia, 69063, Ukraine

Abstract. The article is devoted to the analysis of precast-monolithic construction in Ukraine, which combines the advantages of both precast and cast-in-place frame systems while minimizing their drawbacks. For this reason, precast-monolithic solutions ensure the reliability and cost-efficiency required for contemporary and especially post-war reconstruction. The limited practical experience in constructing precast-monolithic buildings highlights the need for real-world testing of structural and organizational-technological solutions.

The aim of the study is to perform multivariate organizational-technological modelling and compare its results with the actual construction process of an experimental low-rise precast-monolithic building.

The research methodology includes analysis of scientific sources, construction organizational-technological modelling, examination of labour- and machine-hour regulatory standards, as well as on-site observation and time-tracking of construction processes during the erection of the experimental building.

The study produced the following results. It is recommended that organizational-technological modelling of precast-monolithic structures be based on current 2023 regulatory standards, with the option of applying multivariate modelling using regulatory frameworks from the past 40 years when necessary.

The experimental construction of a cottage with dimensions 14×10.5 m (socket-type foundations, 0.3×0.3 m columns, hollow-core slab floors) revealed production challenges during frame erection and enabled a comparison between actual and regulatory values of construction duration and labour intensity. The duration of erecting this precast-monolithic frame amounted to 9, 12, and 24 working days under optimistic, realistic, and pessimistic scenarios, respectively.

Adjustment coefficients to normative values were calculated to support scenario-based planning for the erection of precast-monolithic frames. To account for possible force-majeure conditions, time buffers of 1–4 weeks should be provided.

The results of the study may be useful for multivariate organizational-technological modelling of precast-monolithic buildings of various types and purposes.

Keywords: precast-monolithic frame, organizational-technological modelling, labour costs.

Стаття надійшла до редакції 7.12.2025

Стаття прийнята до друку 28.01.2026

Дата публікації статті 20.03.2026

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@odaba.edu.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 № 15
березень 2026**

Головний редактор *Вировой В.М.*

Технічний редактор *Антонюк Н.Р.*

Підписано до друку 20.03.2026 р.
Формат 60×84/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Цифровий друк. Ум.-друк. арк. 15,2.
Наклад 100 прим. Зам. №20-29Е

Видавець і виготовлювач:

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Свідоцтво ДК № 4515 від 01.04.2013 р.

Україна, 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.

тел. (048) 729-85-34, e-mail: rio@odaba.edu.ua

Надруковано в авторській редакції з готового оригінал-макету
в редакційно-видавничому відділі ОДАБА