



БРЕСТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

М И С И



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# СТРОИТЕЛЬСТВО – ФОРМИРОВАНИЕ СРЕДЫ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Construction – the formation of living environment  
FORM 2025

*Сборник статей  
XXVIII Международной научной конференции  
г. Брест, 23–25 апреля 2025 года*

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФГБОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

# **Строительство – формирование среды жизнедеятельности**

**Construction – the formation of living environment  
FORM 2025**

*Сборник статей  
XXVIII Международной научной конференции  
г. Брест, 23–25 апреля 2025 года*

УДК 69(08)  
ББК 38я4  
С86

***Рецензент:***

**Найчук А. Я.** – профессор кафедры строительных конструкций БрГТУ, д.т.н., доцент

***Редколлегия:***

**Шалобыта Н. Н.** – проректор по научной работе БрГТУ, к.т.н., доцент;

**Павлова И. П.** – декан архитектурно-строительного факультета БрГТУ, к.т.н., доцент;

**Черноиван Н. В.** – заместитель декана по УиНР архитектурно-строительного факультета БрГТУ, к.т.н., доцент;

**Шурин А. Б.** – заведующий кафедрой строительных конструкций БрГТУ, к.т.н., доцент;

**Шешко Н. Н.** – начальник научно-исследовательской части БрГТУ, к.т.н., доцент;

**Ковальчук Е. Н.** – специалист центра медиакоммуникаций и издательской деятельности

С86 Строительство – формирование среды жизнедеятельности = Construction – the formation of living environment : сб. статей XXVIII Междунар. науч. конф., Брест, 23–25 апреля 2025 г. / Брестский государственный технический университет, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет ; редкол.: Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2025. – 156 с.

ISBN 978-985-493-659-8

В сборник вошли статьи по итогам XXVIII Международной научной конференции «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (23–25 апреля 2025 г., г. Брест), в которых представлены результаты исследований преподавателей, научных сотрудников, магистрантов и студентов высших учебных заведений Республики Беларусь и Российской Федерации.

Сборник рассчитан на научных сотрудников, магистрантов и студентов высших учебных заведений.

УДК 69(08)  
ББК 38я4

**ISBN 978-985-493-659-8**

© Издательство БрГТУ, 2025

## ADVANCED TECHNOLOGIES IMPLEMENT SUCH AS DATA ANALYTICS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO ENHANCE DECISION-MAKING PROCESSES IN PROJECT MANAGEMENT IN CIVIL ENGINEERING

*M. M. Kashiripour<sup>1</sup>, A. Y. Almaliki<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *PhD of Architecture, Associate Professor, Department of «Building Materials and Construction Technology», Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: mkashiripour@gmail.com*

<sup>2</sup> *PhD researcher, Construction Faculty, Department of «Building Materials and Construction Technology», Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: anmaaryaseen01@mail.com*

### **Abstract**

With the incorporation of artificial intelligence and data analytics, civil engineering project management is changing and offering chances to improve decision-making, resource allocation, and project results. This article examines how real-time data gathering, building information modeling (BIM), and predictive analytics driven by AI can transform project management in the field of civil engineering. It discusses the necessity of sophisticated project management tools to get beyond the drawbacks of conventional approaches, which frequently result in inefficiencies and project delays. More precise stakeholder communication, risk management, cost estimation, and project scheduling are made possible by the combination of AI and data analytics. This essay also emphasizes the difficulties and moral dilemmas that come with implementing AI, stressing how crucial it is to comprehend its possible drawbacks and hazards. Providing a framework for successfully incorporating AI into decision-making procedures, enhancing project efficiency, and lowering risks in intricate civil engineering projects is the ultimate objective.

**Keywords:** construction, lean, waterfall and critical path methodology, project management methodologies.

### **Introduction**

Complex projects that require careful planning, smooth coordination, and effective execution are what define the civil engineering sector. These projects, which include large-scale building and infrastructure development, produce enormous volumes of data that, when examined, can yield insightful information for better decision-making. The complexity of contemporary projects is frequently too much for traditional project management techniques to handle, leading to poor communication, overspending, and delayed deadlines<sup>4</sup>. As a result, cutting-edge technology like AI and data analytics are becoming more and more necessary to transform project management procedures in this industry [1, 2].

By forecasting project timeframes and streamlining job schedules, sophisticated project management software uses artificial intelligence (AI) to improve planning and scheduling. AI-powered solutions examine past data and outside variables to increase

scheduling precision and avoid delays [3, 4]. Tools for real-time collaboration make it easier for contractors, architects, and engineers to communicate, which lowers mistakes and speeds up decision-making. These platforms offer cloud-based settings where participants may connect quickly via file sharing, video conferencing, and chat, as well as share updates and monitor progress [5].

### **The Role of AI in Transforming Civil Engineering**

- *Enhanced Planning and Scheduling:* In order to forecast timetables, optimize work scheduling, and proactively avoid delays, artificial intelligence algorithms can examine past project data.
- *Real-Time Collaboration:* Engineers, architects, and contractors may communicate easily and receive real-time updates thanks to cloud-based technologies [6, 7].
- *Resource Optimization:* AI makes it easier to allocate resources like labor, materials, and equipment efficiently, reducing waste and increasing output [8].
- *Risk Management:* AI systems use data-driven insights to minimize disruptions by identifying possible risks early and suggesting mitigation solutions [9, 10, 11].
- *Improved Stakeholder Communication:* AI-driven communication technologies provide greater transparency and engagement with investors and clients.

### **Building Information Modeling (BIM)**

A key tool in contemporary civil engineering is building information modeling (BIM), which creates digital representations of real structures to increase design precision and lower construction errors. Stakeholders may work together quickly when BIM is integrated with project management software, guaranteeing design integrity and minimizing deviations over the course of the project. Advanced features like 5D BIM, which incorporates time and cost dimensions into the 3D model to enable more precise project scheduling and budgeting, are part of the growth of BIM. Artificial intelligence and BIM combine to improve predictive maintenance and automate design optimization, which lowers costs and increases project efficiency [12, 13].

#### *Digital Twin Technology*

As cutting-edge instruments, digital twins provide real-time data synchronization with their physical counterparts. For big infrastructure projects in particular, this technology allows for better management and maintenance methods by enabling continuous monitoring and modeling of numerous situations to predict outcomes and enhance performance [14].

#### *The Internet of Things (IoT)*

Real-time site monitoring, equipment usage tracking, and worker safety are made possible by the integration of IoT devices<sup>4</sup>. Continuous data on site conditions is provided by drones and sensors, which reduces potential risks and promotes proactive decision-making [15, 16].

### **Results and discussion**

The development of the domestic economy and the progress of science and technology have promoted the pace of urbanization and the scale of construction. In recent years, the rapid progress and speed of urbanization in my country has led to the gradual emergence of an important development trend: the management of engineering cost

information [17]. This development trend aims to achieve diversification, optimization and management of engineering construction at this stage. The rapid development of government investment projects, the real estate market and other construction engineering markets has led to an expansion in the economic scale of construction engineering in the country. For projects characterized by large-scale, complex structures and significant structural importance, it has become challenging to achieve comprehensive enhancement of economic benefits and technical indicators through conventional engineering management methodologies where. In light of these developments, Building Information Modeling (BIM) technology, which integrates engineering construction information and computer technology, has emerged as a progressive solution [18, 19]. This technology, formally known as Building Information Modeling (BIM), has emerged as a pivotal element in this transformation. This technology has emerged as an indispensable element in the evolution of the construction industry, offering a comprehensive range of applications and contributing significantly to the success of construction projects throughout their entire lifecycle. Construction companies leverage BIM technology in their management processes, thereby enhancing their own construction technology and facilitating the streamlined execution of projects [3].

The advent of Building Information Modelling (BIM) technology has precipitated a paradigm shift within the construction industry, signifying a substantial milestone [4]. The implementation of BIM technology in the construction industry of my country has yielded substantial benefits, including the reduction of time spent on cost estimation and the enhancement of efficiency. Moreover, it has led to the elimination of unbudgeted changes. Recent policy directives and the promotion of engineering technology have led to a steady standardization and normalization of BIM technology within the country [5]. A substantial corpus of theoretical studies has demonstrated that the implementation of BIM technology in cost management of engineering projects can enhance resource utilization, mitigate the issue of escalated engineering costs due to unanticipated issues during the construction process, curtail ineffective work and resource consumption, and furnish a convenient information communication platform for participants in various engineering projects [6]. Concurrently, it has been demonstrated to be an effective measure in mitigating collision problems arising from interdisciplinary collaboration, thereby averting the wastage of resources and costs concomitant with such occurrences. A review of the current application of BIM technology in the cost management of engineering projects in Iraq reveals that the construction of relevant models, the degree of standardizations, and software integration in Iraq are not sufficiently unified. Furthermore, the control of the project's preliminary cost estimation, budget estimate, and budget limit is inadequate, and the cost management advantages of BIM technology have not been fully realized [7].

Building Information Modeling (BIM) has undergone continuous development over the past few decades and has been extensively promoted and applied in both developed and developing countries worldwide. In my country, real estate companies, design agencies, and professional organisations have progressively initiated the implementation of BIM technology in construction projects [8].

The integration of BIM with change control systems has emerged as a pivotal approach for the management of design changes. A change management process and control system for managing changes in detailed design projects were introduced, and

the results of using BIM technology were evaluated to identify changes. By collecting data on actual projects and changes in the projects change control system, it was ultimately concluded that dynamic changes to the change control system combined with BIM technology can reduce design changes [9] built a BIM construction collaboration platform for engineering projects and studied the feasibility of BIM technology in engineering cost management.

The application of BIM technology in the architectural design industry has the potential to enhance the efficiency and scientific rigour of building structure models, thereby improving the design quality of construction projects and enhancing construction safety and efficiency.

Developed countries have been the cradle of the three industrial revolutions. The construction sectors in these countries are relatively mature, and research on controlling construction project costs has already begun. Notable research findings include value engineering theory, total cost management theory, and target cost management theory. Following the establishment of a socialist market economy in the country under discussion, a set of unified management mechanisms has gradually been established in the construction industry, with construction cost management being of particular importance for the management of construction companies [10].

The integration of AI and data analytics in civil engineering projects led to significant improvements in several key areas:

- **Improved Project Scheduling:** AI-powered scheduling tools reduced project delays by an average of 15 % due to more accurate predictions and optimized task management<sup>4</sup>.
- **Cost Reduction:** Real-time cost tracking and predictive analytics helped minimize cost overruns by approximately 10 %, ensuring projects stayed within budget<sup>4</sup>.
- **Enhanced Resource Allocation:** AI algorithms optimized the allocation of resources, resulting in a 20 % increase in resource utilization efficiency<sup>64</sup>.
- **Reduced Risk:** Early identification of potential risks through AI-driven risk assessment tools led to a 25 % reduction in safety incidents and other project disruptions.
- **Better Stakeholder Communication:** Cloud-based collaboration platforms improved communication and transparency, resulting in a 30 % increase in stakeholder satisfaction.

The effective project management is gaining more importance, particularly in complicated projects such as smart city planning, where incidences of over-spending and extended periods have been prevalent [11]. The application of artificial intelligence (AI) in the discipline of project management (PM) has drawn significant attention, signifying tremendous opportunities for innovative advancement [20]. This literature review discusses the current state of AI research in PM, focusing on its impact and integration, identifying major themes, converging and diverging areas, research requirements, methods, and area evolution. The review also discusses critically how these bodies of work converge or diverge in their ecosystem, providing an insight into the real-world applications, issues, and future potential of AI in PM [13].

**AI for Better Decision Making:** AI enables project managers to make data-driven decisions by analyzing large amounts of data and offering predictions and this helps in more effective decision making, moving away from traditional and at times gut-based approaches. **Efficiency and Automation:** AI-driven automation has the ability

to automate processes and reduce project timelines with the help of tools such as robotic process automation (RPA) [14]. This leads to increased efficiency and potentially reduced project costs.

**Resource Optimization:** AI tools can analyze project demands and resource availability to reduce bottlenecks and enhance overall project performance. AI can provide maximum resource allocation, leading to more efficient project execution.

**Risk Mitigation:** AI-based systems employ machine learning models to scan past data, determine probable project risks, and suggest measures of mitigation in real time. Risk management done in an anticipatory fashion can save expenses in delayed completion of projects and project failure.

**Effect on Project Managers:** The integration of artificial intelligence is likely to change the work of project managers, and their skills and responsibilities need to be changed. Project managers must embrace new technologies while emphasizing interpersonal skills and strategic management.

**Ethical Concerns:** AI implementation involves ethical concerns, including algorithmic bias, data privacy, and accountability in AI-driven decision-making. Such concerns must be paid a careful attention to ensure that AI is being used ethically and responsibly [15].

There is a consensus that AI has the potential to bring value to project management practice, particularly in decision-making, efficiency, and risk management.

The need for a comprehensive approach to AI integration is clearly recognized, with a focus on education, organizational empowerment, and ethics.

The advent of the New Economy, characterized by an emphasis on digital technology, coupled with innovations in computer science as exemplified through Moore's Law, have propelled the use of artificial intelligence in project management techniques.

## **Conclusion**

The study confirms that adopting AI requires informed strategies that blend technological advancements with human capabilities. Leadership support, strategic planning, team education, and a phased approach to implementation are vital to success. Future research should focus on addressing current limitations of studies, including expanding participant samples, incorporating diverse perspectives, and using mixed methods. Additionally, longitudinal and cross-sector studies are needed to fully understand the long-term impacts of AI on project management.

## **References**

1. Jiwane, S. The Impact of Artificial Intelligence on Project Management / S. Jiwane. – 2025. – URL: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202504136370> (date of access: 19.04.2025).
2. Grzeszczyk, T. A. Artificial Intelligence and Project Management: An Integrated Approach to Knowledge-based Evaluation / T. A. Grzeszczyk // Taylor & Francis. – 2024.
3. Lankinen, M. Machine learning methods for enhancing engineer-to-order project management / M. Lankinen. – 2025.

4. Каширипур, М. М. Применение метавселенной в городах, её понятие, преимущества и недостатки / М. М. Каширипур // Градостроительство и архитектура. – 2023. – № 13 (3). – С. 168–173.
5. Каширипур, М. М. Возможности искусственного интеллекта в строительной индустрии / М. М. Каширипур, В. А. Николюк // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – № 26 (1). – С. 163–178.
6. Volk, M. Decision support for the technology selection in big data projects: an end-to-end approach (Doctoral dissertation) / M. Volk. – 2022.
7. Assessing the impact of artificial intelligence on project efficiency enhancement / A. Kozhakhmetova, A. Mamyrbayev, A. Zhidebekkyzy, S. Bilan. – Knowledge and Performance Management. – 2024. – No. 8 (2). – P. 109–126. – DOI: 10.21511/kpm.08(2).2024.09.
8. Kashiripur, M. M. Metaverse City: Definition and Direction of Development for Urban Planning and Architecture / M. M. Kashiripur // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – No. 3 (132). – P. 2–10. – DOI: 10.36773/1818-1112-2023-132-3-2-10.
9. Jankovic, M. Discrepancies and analogies in artificial intelligence and engineering design approaches in addressing collaborative decision-making / M. Jankovic, P. Zaraté // International Journal of Decision Support System Technology (IJDSST). – 2011. – No. 3 (2). – P. 1–14.
10. Denni-Fiberesima, D. Critical Success Factors for Project Management Professionals in the Era of AI-Powered Project Portfolio Management (PPEM) / D. Denni-Fiberesima // PriMera Scientific Engineering. – 2024. – No. 4. – P. 13–19.
11. Bakici, T. Big data adoption in project management: insights from French organizations / T. Bakici, A. Neme, Ö. Hazir // IEEE Transactions on Engineering Management. – 2021. – No. 70 (10). – P. 3358–3372.
12. Wittrich, A. Ethical decision-making in the work of project leaders-why ethics gains in importance in future project management / A. Wittrich // In Business and Management'2022, The 12th International Scientific Conference" Business and Management", 12–13 May 2022 Vilnius, Lithuania. – Vilnius : Vilnius Gediminas Technical University, 2022. – P. 1–10.
13. Каширипур, М. М. Новые тенденции и инновации в строительстве: строительство с помощью 3d-принтера / М. М. Каширипур, С. Б. Гарагозов // Инжиниринг и экономика: современное состояние и перспективы развития. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 94–99.
14. Applications of fuzzy multiple criteria decision making methods in civil engineering: A state-of-the-art survey / Z. Wen, H. Liao, E. K. Zavadskas, J. Antuchevičienė // Journal of Civil Engineering and Management. – 2021. – No. 27 (6). – P. 358–371.
15. Nazarov, A. Development of a decision support methodology for optimizing ROI in project management / A. Nazarov // Technology audit and production reserves. – 2025. – Vol. 2, Iss. 82. – P. 58–65. – DOI: 10.15587/2706-5448.2025.326385.
16. Construction project control using artificial neural networks / H. Al-Tabtabai, N. Kartam, I. Flood, A. P. Alex // AI EDAM. – 1997. – Vol. 11, Iss. 1. – P. 45–57.

17. Kashiripoor, M. M. Fourth wave technologies in construction and architecture: from idea to realization (part 2) / M. M. Kashiripoor // Urban construction and architecture. – 2024. – Vol. 14, Iss. 3. – P. 178–193.

18. Jebreili, S. Optimization and computing using intelligent data-driven / S. Jebreili, A. Goli // Optimization and Computing using Intelligent Data-Driven Approaches for Decision-Making: Optimization Applications, 90. – 2024.

19. The Implementation of Artificial Intelligence in Project Management / M. Schrenk, T. Popovich, P. Zeile [et al.]. – 2024. – DOI: 10.48494/REALCORP2024.0078.

20. Yaseen Mawlai, A. A. The impact of advanced information management in civil engineering / A. A. Yaseen Mawlai, K. M. M // International Boletín on Mechanical, Civil and Industrial Engineering. – 2025. – No. 4. – P. 29–36. – URL: <https://top-conferences.us/index.php/IBMCIE/article/view/1405>.

UDC 004.9

## MATHEMATICAL MODELING AND MACHINE LEARNING TECHNIQUES IN SOLVING THE HEAT TRANSFER INVERSE PROBLEMS

*V. N. Sidorov<sup>1</sup>, A. M. Primkulov<sup>2</sup>, E. A. Makarova<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *National Research University Moscow State University of Civil Engineering,  
Moscow, Russia, e-mail: SidorovVN@mgsu.ru*

<sup>2</sup> *National Research University Moscow State University of Civil Engineering,  
Moscow, Russia, e-mail: a.primkulov@prodim.ru*

<sup>3</sup> *National Research University Moscow State University of Civil Engineering,  
Moscow, Russia, e-mail: MakarovaEA@mgsu.ru*

### **Abstract**

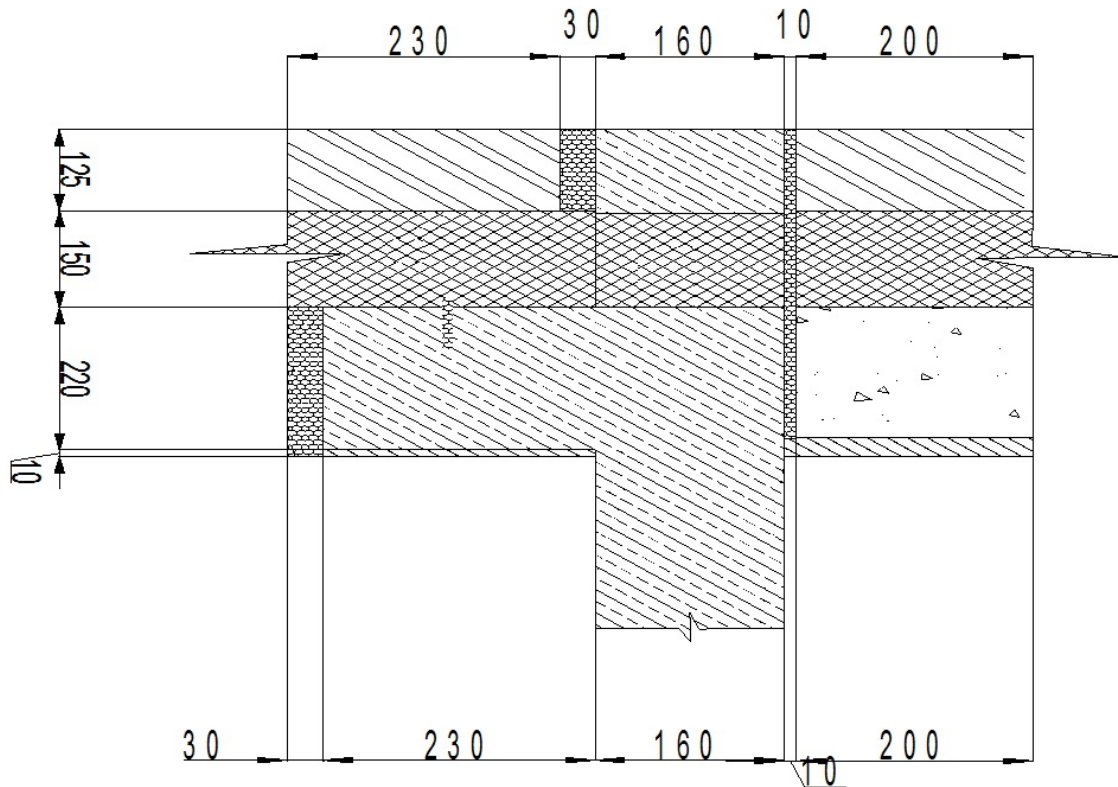
Using temperature values in 2D-space and its variations in time as well as the boundary conditions for both temperatures and vapor pressure an inverse problem has been studied in attempt to infer the conductivity properties of the domain by using the physics informed neural networks. Relying on mathematical models of heat and moisture transfer a set of criteria has been proposed to form the loss functions to train the networks for temperature, vapor pressure, heat flux and conductivity predictions. The neural networks have been trained by using the proposed loss functions and the conductivity coefficients have been approximated to a certain level of accuracy. The results have shown good correlation of predictions to the ground truth values thus confirming good potential of the method and its ability to solve the problems provided that the sufficient number of training epochs have been used. Simultaneous and coupled training of few networks at a time has shown expectedly slow convergency.

### **1 General**

Ability to solve the inverse problems is an important tool that allows to monitor the performance of the structures by inference from some easy-to-measure indirect data. Machine learning methods and techniques renown as physically informed neural

networks (PINN) supported by mathematical modeling frameworks, allowed to incorporate the physics laws into the regression analysis thus increasing the accuracy and soundness of the solutions. Present paper studies an application of PINN technique for solving an inverse problem in heat transfer, namely, it discusses an attempt to predict the ongoing change in the thermal conductivity parameters of the materials composing an exterior wall, by analyzing the variation of temperatures both in space and time within the non-uniform fragment of such a wall. This temperature variation was the result of combined action of different phenomena such as heat transfer, moisture transfer, vapor condensation and evaporation caused by varying in time boundary conditions.

The solution of non-linear, coupled, time-dependent heat transfer problem in two-dimensional space is given in paper [1], that has been used as a source data in the present study. Figure 1 depicts a multi-layered wall and floor slab connection detail, which is used as the model [1].



**Figure 1** – Connection detail of three-layered exterior wall to concrete floor slab. Source “Energy efficient exterior walls with brick veneer. Details. Wall type 1, detail 1 (to section 2–2)” [2]. All dimensions are in mm

### 1.1 Given

Let spatial and temporal variables be defined as  $x, y, t \in (\Omega \times T)$ , where  $\Omega$  is spatial domain, and  $T$  is temporal domain,  $x, y$  – spatial coordinates covering the model (Figure 1). Temperature distribution within the model is given in a discrete form [1] and constitutes the input data or the ground truth for the inverse problem. This data can be written as:

$$\Phi: (x, y \in \mathbb{R}^{207 \times 2}, t \in \mathbb{R}^{200}) \mapsto \phi \in \mathbb{R}^{207 \times 200}, \quad (1)$$

where

$x, y, t \in (\Omega \times T)$ ;

$\Phi$  – an operator that maps spatial and temporal variables to temperature values;

$\phi$  – temperatures °C.

Additionally, mixed boundary conditions (Robin conditions) for the temperature (time dependent variation of heat fluxes and the temperature itself) and Dirichlet boundary conditions for the vapor pressure (time dependent variation of relative humidity indoor and outdoor) are also considered as given [1]. All materials are isotropic. It is also known that conductivities are linearly dependent on material moisture content.

## 1.2 Problem Definition

Having information above, we need to find a function that will correlate the spatial and temporal variables to conductivity coefficient, i. e.

$$\mathcal{D}: (x, y, t) \in \Omega \times T \mapsto \tilde{D}, \quad (2)$$

where

$\tilde{D}$  – conductivity coefficient approximation;

$\mathcal{D}$  – function that maps  $(x, y, t)$  to conductivity coefficient values.

Heat sinks and sources  $Q_h$  are being calculated by using the following expression [1]:

$$Q_h = 595 \theta A \left( \frac{0.0022 k_B}{p_{atm} m} p - \frac{0.0022 k_B}{p_{atm} m} 610.94 e^{\left( \frac{17.625 \phi}{\phi + 243.04} \right)} \right), \quad (3)$$

where

$p$  – vapor pressure within  $\Omega$ ;

$\phi$  – temperature, °C;

$\theta = (25 + 19 v)$  – evaporation coefficient in  $\frac{kg}{m^2 hour}$ ,  $v$  – air flow velocity in  $\frac{m}{sec}$ ,

which is set to zero;

$A$  – moisture to air contact area,  $m^2$ ;

$p_{atm}$  – absolute pressure in Pa (atmospheric pressure);

$m$  – dry air molecular mass;

$k_B$  – Boltzmann constant.

Variation of vapor pressure within  $\Omega$  is unknown and need to be approximated in form of:

$$\mathcal{P}: (x, y, t) \in \Omega \times T \mapsto \tilde{P}, \quad (4)$$

where

$\tilde{P}$  – approximate values of vapor pressure in  $(x, y)$  at any time  $t$ ;

$\mathcal{P}$  – a function that maps  $(x, y, t) \in \Omega \times T$  to vapor pressure values.

## 2 Materials and Methods

### 2.1 Neural Networks

Let seek all unknown functions in form of the neural networks, such that:

$$\tilde{D} = D_{min} + (D_{max} - D_{min}) \sigma(NN_{\mathcal{D}}(x, y, t; \theta_D)), \quad (5)$$

where

$\tilde{D}$  – approximate values of conductivity coefficient;

$D_{min}, D_{max}$  – minimum and maximum possible values of conductivity coefficients within the domain. This is a-priori information aimed to limit the solution of ill-posed

problem to a pre-set range. Maximum and minimum values of conductivities for materials that are usual in construction industry are known from the literature [4];

$\sigma(\cdot)$  – sigmoid function with a range [0,1];

$NN_D$  – a neural network;

$x, y, t$  – spatial and temporal arguments defined in  $\Omega \times T$ ;

$\theta_D$  – neural network parameters.

Similarly, for (4), the vapor pressure function shall have the form of:

$$\tilde{P} = P_{out}(t) + (P_{in}(t) - P_{out}(t))\sigma(NN_P(x, y, t; \theta_P)), \quad (6)$$

where

$\tilde{P}$  – vapor pressure approximation;

$P_{in}(t), P_{out}(t)$  – vapor pressure values at inner and outer face of the wall at a time

$t$  – the boundary conditions;

$NN_P$  – a neural network;

$\theta_P$  – neural network parameters;

see (5) for others.

Additionally, we introduce the following functions:

– Normalized temperature as a function of space and time

$$\bar{\phi} = \sigma(NN_\phi(x, y, t; \theta_\phi)), \quad (7)$$

where

$\bar{\phi}$  – approximate values of temperatures normalized to a range of [0,1];

$NN_\phi$  – neural network;

$\theta_\phi$  – neural network parameters;

see (5) for others. This function is normalized continuous form of (1).

– Heat flux vector function of space and time

$$\{\tilde{Jh}\} = Jh_{min} + (Jh_{max} - Jh_{min})\sigma(NN_J(x, y, t; \theta_J)), \quad (8)$$

where

$\{\tilde{Jh}\}$  – a vector  $(\tilde{Jh}_x, \tilde{Jh}_y)$  of heat flux at  $x, y, t$ ;

$Jh_{min}, Jh_{max}$  – minimum and maximum possible values of heat flux with in  $\Omega \times T$ , that can be approximated from Robin boundary conditions for the temperatures;

$NN_J$  – neural network generating a vector  $\{NN_{Jx}, NN_{Jy}\}^T$ ;

$\theta_J$  – neural network parameters;

see (5) for others.

## 2.2 Loss functions

In order to train the networks, or, in other words, to determine network parameters we need to build, so called, loss functions that will be used in optimization calculations. The following criteria are proposed to evaluate how accurate the predictions are, on one side and to regularize them to avoid the overfitting.

### 2.2.1 Neural network for prediction of temperatures (7)

a) “Prediction versus the Ground Truth” Criterion – Supervised Learning

$$\mathcal{L}\Phi_1 = \|\bar{\phi} - \phi\|_2, \quad (9)$$

where

$\bar{\phi}$  – temperature predictions by neural network for  $(x, y, t) \in \Omega \times T$ ;

$\phi$  – temperature values as per (1) for the same  $(x, y, t) \in \Omega \times T$ , the ground truth;

b) *Regularization Criteria*

$$\mathcal{L}_{\phi_2} = \|\bar{\phi}_x\|_2 + \|\bar{\phi}_y\|_2 \quad (10)$$

$$\mathcal{L}_{\phi_3} = \|\bar{\phi}_{xx}\|_2 + \|\bar{\phi}_{yy}\|_2 \quad (11)$$

$$\mathcal{L}_{\phi_4} = \|\bar{\phi}_{xxx}\|_2 + \|\bar{\phi}_{yyy}\|_2 \quad (12)$$

where

$\bar{\phi}_x = \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x}$  – first partial derivative of temperature predictions over  $x$ ;

$\bar{\phi}_y = \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y}$  – first partial derivative of temperature predictions over  $y$ ;

$\bar{\phi}_{xx} = \frac{\partial^2 \bar{\phi}}{\partial x^2}$  – second partial derivative of temperature predictions over  $x$ ;

$\bar{\phi}_{yy} = \frac{\partial^2 \bar{\phi}}{\partial y^2}$  – second partial derivative of temperature predictions over  $y$ ;

$\bar{\phi}_{xxx} = \frac{\partial^3 \bar{\phi}}{\partial x^3}$  – third partial derivative of temperature predictions over  $x$ ;

$\bar{\phi}_{yyy} = \frac{\partial^3 \bar{\phi}}{\partial y^3}$  – third partial derivative of temperature predictions over  $y$ ;

c) *“Predicted Time Derivative versus Ground Truth Time Derivative” Criterion – Supervised Learning*

$$\mathcal{L}_{\phi_5} = \|\bar{\phi}_t - \phi_t\|_2, \quad (13)$$

where

$\bar{\phi}_t = \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t}$  – first partial derivative of temperature predictions over time;

$\phi_t$  – first partial derivative of temperature over time as per (1), calculated by using finite differences method.

d) *“Fourier’s Law” Criteria*

As per Fourier’s Law [5], the heat flux predictions of (8) can be assessed jointly with temperature predictions (7) and conductivity predictions (5) by the following equations:

$$\mathcal{L}_{\phi_6} = \left\| \tilde{J}h_x + \tilde{D} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \right\|_2 \quad (14)$$

$$\mathcal{L}_{\phi_7} = \left\| \tilde{J}h_y + \tilde{D} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} \right\|_2, \quad (15)$$

where

$\tilde{J}h_x$  – heat flux at  $x$  direction as predicted by (8);

$\tilde{J}h_y$  – heat flux at  $y$  direction as predicted by (8);

$\tilde{D}$  – conductivity coefficients as predicted by (5);

$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x}, \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y}$  – spatial derivatives of temperature predictions  $\bar{\phi}$  at  $x, y$  directions respectively;

e) *“Heat Balance Equation” Criterion*

$$\mathcal{L}_{\phi_8} = \left\| -\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \tilde{D} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \tilde{D} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} \right) + Q_h(\tilde{P}, \bar{\phi}) \right\|_2, \quad (16)$$

where

$Q_h(\tilde{P}, \bar{\phi})$  – an energy consumed/expelled during evaporation/condensation as per (3)

$$Q_h(\tilde{P}, \bar{\phi}) = 595 \theta A \left( \frac{0.0022 k_B}{p_{atm} m} \tilde{P} - \frac{0.0022 k_B}{p_{atm} m} 610.94 e^{\left(\frac{17.625 \bar{\phi}}{\bar{\phi} + 243.04}\right)} \right), \quad (17)$$

$\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t}$  – temporal derivative of temperature predictions  $\bar{\phi}$ ;

others see (14), (15);

f) “Gauss – Green Theorem” Criterion.

Gauss – Green theorem correlates the changes of a vector field within a closed area to the changes of that field along the boundary of the same area.

$$\mathcal{L}\Phi_9 = \|J_{bc}^\omega + J_{in}^\omega\|_2, \quad (18)$$

where

$$J_{bc}^\omega = \oint_S \left( \tilde{D} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \cos(\alpha) + \tilde{D} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} \sin(\alpha) \right) dS; \quad (19)$$

$$J_{in}^\omega = \iint_\omega \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \tilde{D} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \tilde{D} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} \right) + Q_h(\tilde{P}, \bar{\phi}) \right) d\omega, \quad (20)$$

where

$\alpha$  – an angle between positive  $x$  direction and an outward normal to boundary  $S$  of subdomain  $\omega$  such that;

$\Omega = \bigcup_{i=1}^N \omega_i$ , where  $N$  – number of subdomains;

$J_{bc}^\omega$  – total heat flux change along the boundary of the subdomain  $\omega$ ;

$J_{in}^\omega$  – total heat flux change within  $\omega$ .

Having specified the criteria above, the total loss function for this network then might be presented as their sum.

$$\mathcal{L}\Phi = \sum_{i=1}^9 \mathcal{L}\Phi_i. \quad (21)$$

In order to determine the parameters of the neural networks the following optimization problem needs to be solved.

$$\theta_\phi = \operatorname{argmin}_{\theta_\phi} (\mathcal{L}\Phi) = \{(x, y, t) \in \Omega \times T : \mathcal{L}\Phi(x, y, t) \leq \epsilon\}, \quad (22)$$

where  $\epsilon$  – accuracy of the solution.

### 2.2.2 Neural Network for Prediction of Vapor Pressure (6)

Let denote as  $p_{bc} = \{p_{in}, p_{out}\}^T$  the vapor pressures values at the boundaries of  $\Omega$ , being given as Dirichlet boundary conditions as per [1]. Also, let  $\partial\Omega_{in}$  be a boundary of  $\Omega$  facing the indoor environment and  $\partial\Omega_{out}$  – a boundary facing the outdoor environment, then:

a) “Prediction versus Boundary Conditions” Criteria

$$\mathcal{L}p_1 = \|\tilde{P}(\partial\Omega_{in} \vee \partial\Omega_{out}) - p_{bc}\|_2; \quad (23)$$

b) “Phase Change Heat” Criterion

$$\mathcal{L}p_2 = \left\| Q_h^{(1)}(\tilde{P}, \bar{\phi}) - Q_h^{(2)}(\tilde{P}, \bar{\phi}) \right\|_2, \quad (24)$$

where

$$Q_h^{(1)}(\tilde{P}, \bar{\phi}) = \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} \right); \quad (25)$$

$$Q_h^{(2)}(\tilde{P}, \bar{\phi}) = 595 \theta A \left( \frac{0.0022 k_B}{p_{atm} m} \tilde{P} - \frac{0.0022 k_B}{p_{atm} m} 610.94 e^{\left(\frac{17.625 \bar{\phi}}{\bar{\phi} + 243.04}\right)} \right), \quad (26)$$

$\tilde{D}$  – conductivity coefficients as predicted by (5);

c) “First Derivatives” as Regularization

$$\mathcal{L}p_3 = \|\tilde{P}_x\|_2 + \|\tilde{P}_y\|_2 + \|\tilde{P}_t\|_2, \quad (27)$$

where

$\tilde{P}_x = \frac{\partial \tilde{P}}{\partial x}$  – first partial derivative of vapor pressure over  $x$ ;

$\tilde{P}_y = \frac{\partial \tilde{P}}{\partial y}$  – first partial derivative of vapor pressure over  $y$ ;

$\tilde{P}_t = \frac{\partial \tilde{P}}{\partial t}$  – first partial derivative of vapor pressure over time;

d) “Prediction to be Close to Mean” Criterion.

As a regularization criterion it is assumed that the predicted vapor pressure values need to be close to mean values calculated as a linear interpolation across the domain  $\Omega$ , between its boundary values.

$$\mathcal{L}p_4 = \|\tilde{P} - \hat{P}\|_2, \quad (28)$$

where

$$\hat{P} = p_{out} + \frac{p_{in} - p_{out}}{\Omega}(x, y, t), \quad (29)$$

$\hat{P}$  – linear interpolation between  $p_{in}, p_{out}$  within  $\Omega$  at any given time  $t$ ;  
 $(x, y, t) \in \Omega \times T$ .

Total loss function for this network will have a form of:

$$\mathcal{L}_p = \sum_{i=1}^4 \mathcal{L}_{p_i}. \quad (30)$$

Optimization problem to determine network parameters has the following form:

$$\theta_p = \operatorname{argmin}_{\theta_p} (\mathcal{L}_p) = \{(x, y, t) \in \Omega \times T: \mathcal{L}_p(x, y, t) \leq \epsilon\} \quad (31)$$

where  $\epsilon$  – accuracy of the solution.

### 2.2.3 Neural Network for Prediction of Heat Flux Values (8)

The following criteria shall be used for training of heat flux neural network.

a) “Predictions versus Robin Boundary Conditions” Criterion

$$\mathcal{L}_{J_1} = \left\| \sqrt{(\tilde{J}h_{in})_x^2 + (\tilde{J}h_{in})_y^2} - Jh_{in} \right\|_2 + \left\| \sqrt{(\tilde{J}h_{out})_x^2 + (\tilde{J}h_{out})_y^2} - Jh_{out} \right\|_2, \quad (32)$$

where

$Jh_{in}, Jh_{out}$  – heat flux values at inner and outer face of  $\Omega$  at a time  $t$  – Robin boundary conditions;

$(\tilde{J}h_{in\ x}, \tilde{J}h_{in\ y})$  – neural network prediction for heat flux at  $\partial\Omega_{in}$ ;

$(\tilde{J}h_{out\ x}, \tilde{J}h_{out\ y})$  – neural network prediction for heat flux at  $\partial\Omega_{out}$ ;

b) “Prediction to be Close to Mean” as Regularization Criterion.

$$L_{J_2} = \|\tilde{J}h_{tot}(x, t) - \hat{J}h(x, t)\|_2, \quad (33)$$

where

$\tilde{J}h_{tot}(x, t)$  – heat flux as predicted by neural network (8), passing through a plane along  $y$  direction and at any given  $x$  and time  $t$ .

$$\tilde{J}h_{tot}(x, t) = \int_{y_{min}}^{y_{max}} \tilde{J}h(x, t) dy. \quad (34)$$

$\hat{J}h(x, t)$  – heat flux passing through a vertical plane at any given  $x$ , in a moment  $t$ , being calculated as linear interpolation between boundary values;

$$Jt_{out}(t) = \int_{\Omega_{out}} J h_{out}(t) d\Omega_{out}; \quad (35)$$

$$Jt_{in}(t) = \int_{\Omega_{in}} J h_{out}(t) d\Omega_{in}; \quad (36)$$

$$\widehat{h}(x, t) = Jt_{out} + \frac{Jt_{in} - Jt_{out}}{\Omega}(x, t); \quad (37)$$

$Jt_{out}(t), Jt_{in}(t)$  – total heat flux leaving and entering  $\Omega$  at time  $t$ , respectively;

$(x, t)$  –  $x$  coordinate and time argument  $t$ ;

c) “Heat Flux Direction” Criterion.

From Fourier’s Law we know that heat flux needs to be opposite directed to the space derivatives of the temperature. Hence

$$\mathcal{L}_{J_3} = \|\bar{\phi}_x^{norm} + \tilde{h}_x^{norm}\|_2 + \|\bar{\phi}_y^{norm} + \tilde{h}_y^{norm}\|_2, \quad (38)$$

where

$\nabla\bar{\phi}^{norm} = (\bar{\phi}_x^{norm}, \bar{\phi}_y^{norm})$  – unit vector of temperature gradients, predicted by neural network (7);

$\tilde{h}^{norm} = (\tilde{h}_x^{norm}, \tilde{h}_y^{norm})$  – unit vector of heat flux, predicted by neural network (8);

d) “Heat Balance Equation” Criterion

$$\mathcal{L}_{J_4} = \left\| -\frac{\partial\bar{\phi}}{\partial t} + \frac{\partial\tilde{h}_x}{\partial x} + \frac{\partial\tilde{h}_y}{\partial y} + Q_h(\bar{P}, \bar{\phi}) \right\|_2; \quad (39)$$

$\frac{\partial\tilde{h}_x}{\partial x}, \frac{\partial\tilde{h}_y}{\partial y}$  – space derivatives of heat flux predictions;

e) “Gauss – Green Theorem” Criterion

$$\mathcal{L}_{J_5} = \|J_{bc}^\omega + J_{in}^\omega\|_2, \quad (40)$$

where

$$J_{bc}^\omega = \oint_S (\tilde{h}_x + \tilde{h}_y) dS, \quad (41)$$

$$J_{in}^\omega = \iint_\omega \left( \frac{\partial\tilde{h}_x}{\partial x} + \frac{\partial\tilde{h}_y}{\partial y} + Q_h(\bar{P}, \bar{\phi}) \right) d\omega. \quad (42)$$

Total loss function for neural network (8) is then:

$$\mathcal{L}_J = \sum_{i=1}^5 \mathcal{L}_{J_i}. \quad (43)$$

In order to determine the network parameters, the following optimization problem need to be solved:

$$\theta_J = \operatorname{argmin}_{\theta_J} (\mathcal{L}_J) = \{(x, y, t) \in \Omega \times T : \mathcal{L}_J(x, y, t) \leq \epsilon\}, \quad (44)$$

where  $\epsilon$  – accuracy of the solution.

#### 2.2.4 Neural Network for Prediction of Conductivity Coefficients (5)

The criteria for this network are:

a) “Heat Balance Equation” Criterion

$$\mathcal{L}_{D_1} = \left\| -\frac{\partial\bar{\phi}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \tilde{D} \frac{\partial\bar{\phi}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \tilde{D} \frac{\partial\bar{\phi}}{\partial y} \right) + Q_h(\bar{P}, \bar{\phi}) \right\|_2; \quad (45)$$

b) “Fourier’s Law” Criteria

$$\mathcal{L}_{\mathcal{D}_2} = \|\tilde{J}h_x + \tilde{D} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x}\|_2 ; \quad (46)$$

$$\mathcal{L}_{\mathcal{D}_3} = \|\tilde{J}h_y + \tilde{D} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial y}\|_2 ; \quad (47)$$

c) “Gauss – Green Theorem” Criterion

$$\mathcal{L}_{\mathcal{D}_4} = \|J_{bc}^\omega + J_{in}^\omega\|_2 , \quad (48)$$

where

$J_{bc}^\omega, J_{in}^\omega$  – the same as in (19) and (20).

Total loss function is then:

$$\mathcal{L}_{\mathcal{D}} = \sum_{i=1}^4 \mathcal{L}_{\mathcal{D}_i} . \quad (49)$$

Similar to other networks the optimization problem to find network parameters has a form:

$$\theta_{\mathcal{D}} = \operatorname{argmin}_{\theta_{\mathcal{D}}} (\mathcal{L}_{\mathcal{D}}) = \{(x, y, t) \in \Omega \times T : \mathcal{L}_{\mathcal{D}}(x, y, t) \leq \epsilon\}, \quad (50)$$

where  $\epsilon$  – accuracy of the solution.

### 2.3 Training

While the training of the networks the relevant loss functions were weighted by adaptive Lagrange multipliers as recommended in [7].

$$\mathcal{L}_{\mathcal{NN}} = \sum_{i=1}^N \left( \lambda_i \mathcal{L}_i + \frac{1}{2} \log \left( \frac{1}{2\lambda_i} \right) \right), \quad (51)$$

where

$\mathcal{L}_{\mathcal{NN}}$  – total loss function of  $N^{\text{th}}$  (or respective) neural network;

$N$  – number of criteria of relevant loss function;

$\lambda_i$  – Lagrange coefficient, such that

$$\lambda_i = \frac{1}{2(s_{(i)}^2 + \gamma^{-1})}, \quad (52)$$

where

$i$  – index of associated criterion;

$\gamma^{-1}$  – top limit for Lagrange coefficients [7];

$s_{(i)}^2$  – variance of residuals for  $i^{\text{th}}$  criterion of associated loss function. For instance, for 4<sup>th</sup> criterion of network (8) the variance is calculated as:

$$s_{(4)}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \left( (J_{bc}^\omega)_j - (-J_{in}^\omega)_j \right)^2}{N-1}, \quad (53)$$

$N$  – number of values in a training batch.

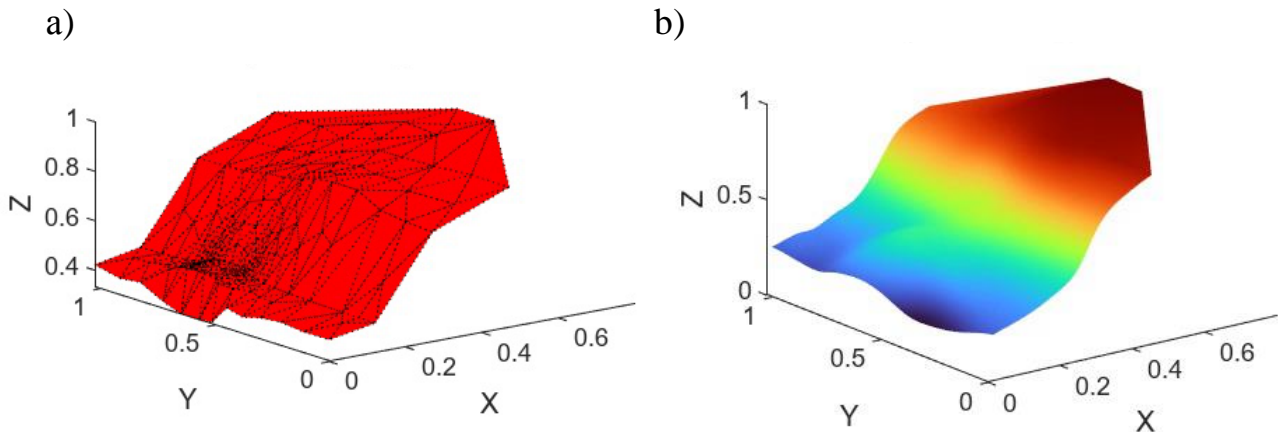
## 3 Results

Neural networks architecture and training parameters are given in Table 1.

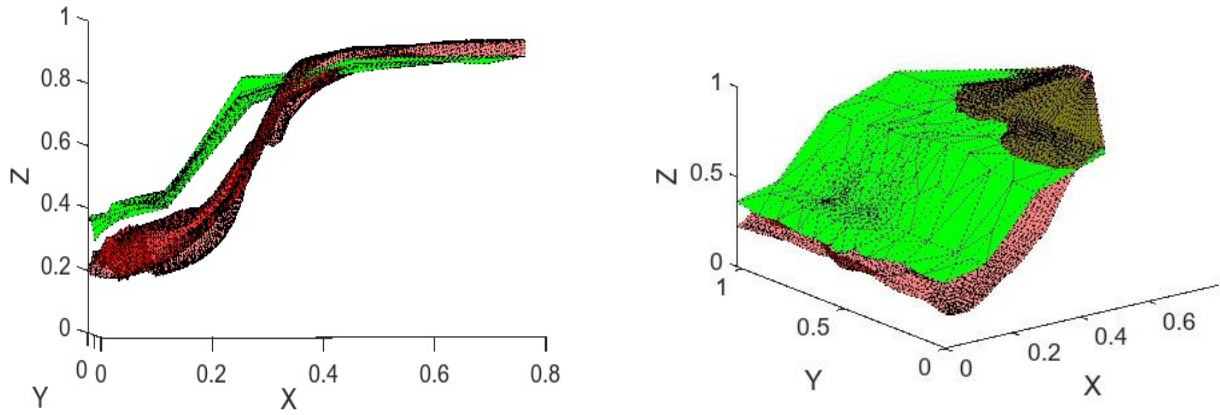
Figure 2 shows (a) the temperature distribution within the domain as it is predicted by neural network (7) upon completion of first stage of training and (b) the ground truth values as per (1). First stage training was performed by using supervised learning criteria only. Relative error is amounted up to 30 %. Second training stage was coupled as all four networks were trained simultaneously by using each other’s predictions in their respective loss functions. Figure 3 depicts the ground truth temperatures as per (1) and neural network (7) predictions after the second stage of training.

**Table 1** – Neural Networks’ Architectures

Item	Neural Network for Temperatures (7)	Neural Network for Heat flux (8)	Neural Network for Vapor Pressure (6)	Neural Network for Conductivity Coefficient (5)
Input layer. Number of neurons (x, y, t)	3	3	3	3
Number of output neurons	1	2	1	1
Number of hidden layers	7	6	5	5
<i>Number of neurons in hidden layers</i>				
Hidden Layer 1	40	15	20	20
Hidden Layer 2	25	20	20	20
Hidden Layer 3	30	30	20	20
Hidden Layer 4	40	25	20	20
Hidden Layer 5	30	20	20	20
Hidden Layer 6	25	15	–	–
Hidden Layer 7	40	–	–	–
Skip connections	1 → 7, 2 → 6	1 → 6, 2 → 5	1 → 5, 2 → 4	1 → 5, 2 → 4
Training curriculum	2 staged	Single staged	Single staged	Single staged
Number of epochs	40000+10000	10000	10000	10000



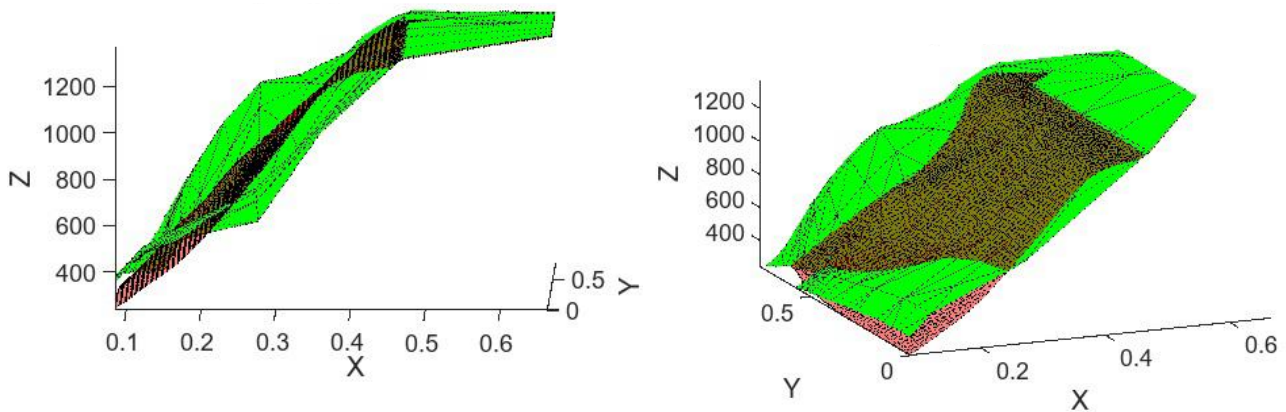
**Figure 2** – The temperature values (a) the ground truth values as per (1); (b) predictions of the neural network (7) after first stage of training. X, Y – spatial coordinates in  $\Omega$ , Z – normalized temperature values. The values are given for a moment of  $t = 0.32663$



**Figure 3** – The temperature values at time  $t = 0.94472$ . Green – ground truth (1), red – prediction of (7). X, Y – spatial coordinates in  $\Omega$ , Z – normalized temperature values

Relative error has increased till 40 % due to inclusion of other networks into training process that has negatively affected the predictions temperature network (7).

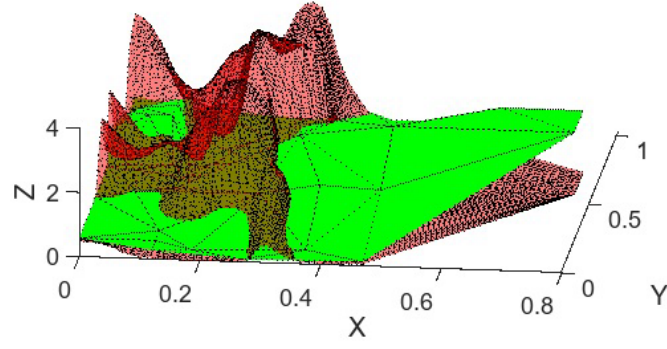
Figure 4 shows vapor pressure values predicted by neural network (6) in comparison with values obtained in [1]. As it was noted above, the training of this network has been carried out by using the boundary conditions and indirect criteria (24) and (25).



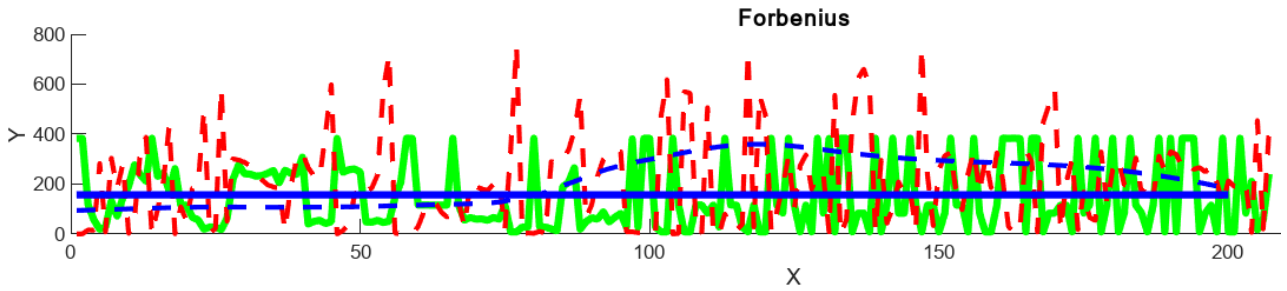
**Figure 4** – Vapor pressure values within  $\Omega$  at time  $t = 0.94472$ . Green – ground truth values [1], red – predictions of (6). X, Y – spatial coordinates in  $\Omega$ , Z – vapor pressure values

Figure 5 shows the values of conductivity coefficients as predicted by neural network (5) in comparison to data in [1]. The highest error values are occurring in this network's predictions as they aggregate the errors of all other networks.

Figure 6 depicts Forbenius norms for space and time series of conductivity coefficient predictions over  $(\Omega \times T)$ . As it can be seen, the proposed loss functions indeed train the networks, however more epochs and further refinements are needed to reduce the training errors.



**Figure 5** – Conductivity coefficients at time  $t = 0.94472$ . Green – ground truth values [1], red – predictions of neural network (5). X, Y – spatial coordinates in  $\Omega$ , Z – conductivity coefficient values



**Figure 6** – Forbenius norms. Green solid line (Y) – Forbenius norm values of all spatial collocation points  $(x, y) \in \Omega$  as per the ground truth data (1); Red dashed line (Y) – Forbenius norm values of all spatial collocation points  $(x, y) \in \Omega$  as predicted by neural network (5), (X) time steps  $t \in T$ ; Blue solid line (Y) – Forbenius norm through all time steps of each collocation point  $(x, y) \in \Omega$  of ground truth values; Blue dashed line (Y) – Forbenius norm through all time steps of each collocation point  $(x, y) \in \Omega$  as predicted by (5), (X) collocation point number

#### 4 Conclusions

At the result of the study, the followings might be concluded:

1. Inverse problems are knowingly ill-posed, therefore every problem requires an individual strategy for its solving. In case of neural network, due care needs to be given to proper selection of loss function criteria.
2. Mathematical models of heat and moisture transfer and the underlying physics laws adopted in training criteria allow to train the networks even with limited ground truth data.
3. Having properly selected the training criteria, the machine learning techniques become powerful and effective tools for solving the inverse problems. As equally, the architecture of the networks should be carefully selected by analyzing the particularities of the problem. In the present study, the inclusion of skip connections in network architecture allowed to avoid gradient vanishing problem.
4. Large number of criteria combined in a loss function may complicate the training process, therefore a contribution of each criterion needs to be adjusted dynamically during the training. Adaptive Lagrange coefficients allow to level or magnify the effect of any single criterion thus to dose them as relevant during the training process.

5. Coupled inverse problems require prolonged training time as the optimization needs to be achieved in all neural networks simultaneously.

### References

1. Sidorov, V. N. Semi Analytical Solution to Coupled Transient Non-linear Heat Transfer Problem in 2D Space / V. N. Sidorov, A. M. Primkulov // Digital transformation of complex processes of Urban building activities : International Baikal Investment and Construction Forum. – Irkutsk, 2024.

2. OAO “TsNIIEP of residential and public buildings”, “TSNIISK named after V.A. Kucherenko”, “Typical details of multi-layered exterior walls with 120 mm of outer brick veneers (with widened external layer or void ratio of 13 %), for use in residential and public buildings with total height up to 75m”. – Moscow, 2010.

3. Hadamard, Jacques. Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique / Jacques Hadamard. – Princeton University Bulletin. – 1902. – Vol. XIII, iss. 4. – P. 49–52.

4. Heat transfer for construction purposes : SNIP II-3-79. Building codes and regulations. – Moscow, 1986.

5. Lykov, A. V. Theoretical fundamentals of building physics / A. V. Lykov. – Minsk, 1961.

6. Kendall, A. Multi-Task Learning Using Uncertainty to Weigh Losses for Scene Geometry and Semantics / A. Kendall, Y. Gal, R. Cipolla. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1705.07115v3> (date of access: 24.03.2025).

7. Niu, P. Improved physics-informed neural network in mitigating gradient related failures / Pancheng Niu, Chen Yongming, Guo Jun [et al.]. – 2024. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2407.19421> (date of access: 24.03.2025).

8. Monaco, S. Training physics-informed neural networks: One learning to rule them all? / Simone Monaco, Daniele Apiletti // Results in Engineering. – Vol. 18. – 2023. – DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101023.

9. Brunton, Steven L. Data-Driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control / Steven L. Brunton, Nathan J. Kutz. – Second Edition. – Cambridge : Cambridge University Press, 2022.

10. He, Z. A physics-informed deep learning method for solving direct and inverse heat conduction problems of materials / Zhili He, Fuato Ni, Weigo Wang, Jiang Zhang // Materials Today Communications. – 2021. – Vol. 28. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102719.

11. Wang, S. Understanding And Mitigating Gradient Pathologies in Physics-Informed Neural Networks / Sifan Wang, Teng Yujun, Perdikaris Paris. – 2020. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2001.04536v1>.

12. He, K. Deep Residual Learning for Image Recognition / Kaiming He, Zhang Xiangyu, Ren Shaouqing. – 2015. – URL: <https://arxiv.org/abs/1512.03385>.

13. Sidorov, V. N. Coupled Heat and Mass Transfer Problem with Dependent Heat Conductivity Properties and its Semi-Analytical Solution / V. N. Sidorov, A. M. Primkulov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2023. – Vol. 19, iss.3. – P. 69–82.

## VARIATIONS OF THE OPEN CHANNEL MINIMUM RUNOFF OF THE PRIPYAT RIVER AT THE MOZYR GAUGING STATION: CURRENT STATUS AND FORECAST

A. A. Volchak<sup>1</sup>, S. I. Parfomuk<sup>2</sup>, S. V. Sidak<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: volchak@tut.by*

<sup>2</sup> *Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: parfom@mail.ru*

<sup>3</sup> *Brest State Technical University, Brest, Belarus, e-mail: harchik-sveta@mail.ru*

### **Abstract**

The article presents the results of a study of the sample estimates stability of statistical parameters for various intervals of the time series of open channel minimum water discharges of the Pripyat River at the Mozyr gauging station for the period from 1877 to 2020. The intervals of the series that differ in the degree of anthropogenic impact on runoff and the type of atmospheric circulation are considered. A conclusion is made about the presence of statistically significant changes in the dynamics of the open channel minimum runoff of the Pripyat River at the Mozyr station, caused by both natural climatic and anthropogenic changes in the hydrological cycle.

### **1 Introduction**

Rational use of water resources and planning of economic activity for the future is impossible without knowledge of the patterns of water content formation in the territory, manifested in fluctuations of river runoff, which are of a stochastic nature. The water regime of rivers can objectively characterize the moisture content of large territories, since the water runoff is formed on the catchment area and in an integrated form in the closing section. This is especially true for the open channel minimum runoff, i. e. the minimum summer-autumn runoff.

One of the main natural resources of the Belarusian Polesie is water resources, which are characterized by dynamics, and their complex and rational use is impossible without predictive quantitative assessments.

The purpose of this work was an objective assessment of fluctuations in the open channel minimum water runoff of the Pripyat River at the Mozyr gauging station to characterize the water regime of the Belarusian Polesie in modern conditions and in the near future.

### **2 Materials and methods**

Belarusian Polesie is located in the south of Belarus and occupies an area of about 61 thousand km<sup>2</sup>, which is about a third of the country's territory. The surface is water-glacial and lake-alluvial sandy lowland with ancient floodplain terraces. The climate is warm, unstable-humid, approaching forest-steppe in the southeast. The average January temperature is from –4.4 °C in the west to –7 °C in the east, July – from 18 °C to 19 °C. Precipitation is 520–645 mm per year [1]. Large-scale me-

loration in the middle of the last century and modern climate changes have made a significant contribution to the natural development of natural processes in the region.

In the study of temporary fluctuations in the water regime of rivers, the most complete information can be achieved by analysing long-term time series of hydrological characteristics that are formed from large catchments. For these purposes, a time series of open-channel minimum water discharges of the Pripyat River at the Mozyr gauging station were used (catchment area of 101,000 km<sup>2</sup>). The main river, the Pripyat, with numerous tributaries and a dense network of drainage canals and ditches, with a large number of floodplain lakes, the catchment of which includes most of Polesie, is a typical trans boundary river of Europe, flows through the territory of two states, Belarus and Ukraine, and determines both the water regime of the region and its economy. The length of the studied time series is 144 years (from 1877 to 2020). The missing runoff values for 1877–1880, 1917, and 1941–1943 were calculated using the computer software package Hydrolog-2 [2, 3] using the river analogue of the Neman River at Grodno station, for which missing data on runoff were previously restored using the analogue river Neman at Smalininkai station[4]. One of the objectives of the study was to assess the stationarity of time series of annual river runoff with varying degrees of anthropogenic load.

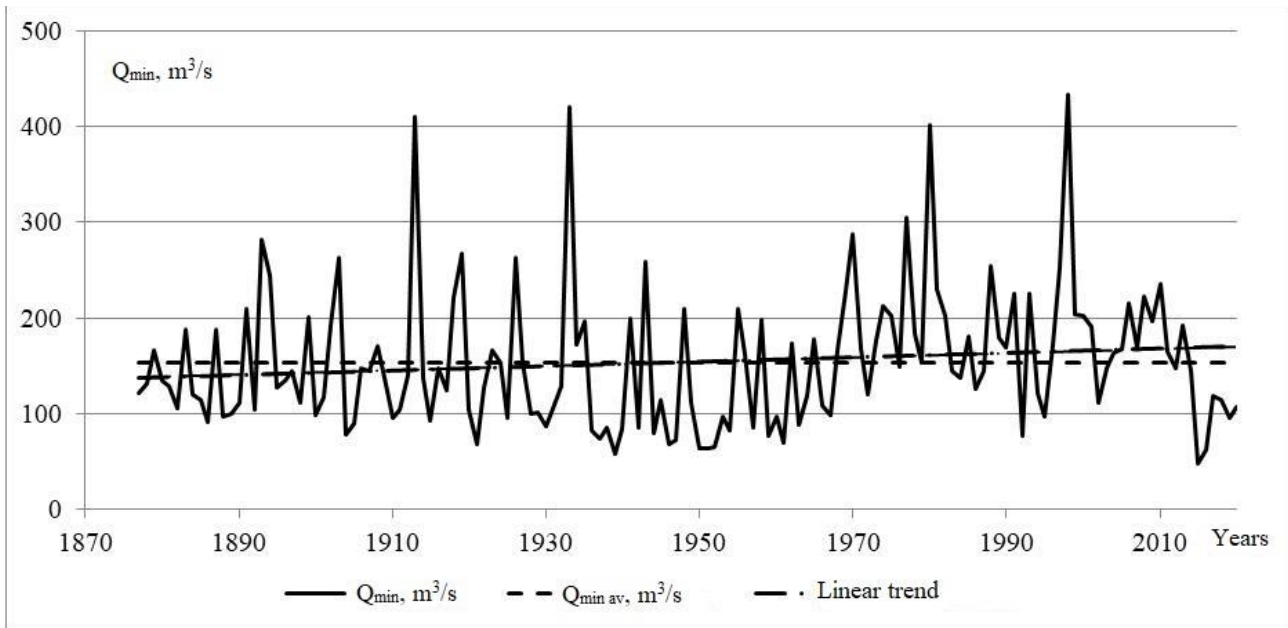
Long-term fluctuations of minimum open river channel water discharges ( $Q_{min}$ ) are considered as a random process  $Q_{min}(t)$  with discrete time  $t \in T$ , taking integer values. In particular, the value  $t = 1, 2, \dots, k$  can be attributed to the available series of observations for  $k$  years; the values  $t = 0, k-1, k-2, \dots$  relate to the previous period of time, and the value  $t = k + 1, k + 2, \dots$  – to the next. To describe the process  $Q_{min}(t)$ , a whole set of functions was used: mathematical expectation  $m(t) = M\{Q(t)\}$ , variance  $D(t) = D\{Q(t)\}$ , standard deviation  $\sigma(t) = \sqrt{D(t)}$ , probability distribution  $F(x, t) = P\{Q(t) < x\}$ ; autocorrelation function  $R(t, \tau) = corr\{Q(t), Q(t + \tau)\}$ , etc. [5–7].

The assessment of the agreement between the adopted theoretical scheme and the empirical material was carried out using statistical hypotheses of the homogeneity of time series of the open channel minimum runoff of the Pripyat River at the Mozyr gauging station according to the standard parametric Student's criteria (assessment of the t-statistic – the significance of norms) and Fisher's (assessment of the F-statistic – the ratio of variances).

### 3 Results and discussion

Figure 1 shows the long-term course of minimum open-channel water discharges of the Pripyat River at the Mozyr gauging station. The graph shows some cyclical oscillations: in the period from 1877 to 1893, there is a slight increase in water content, which is replaced by a decrease in water content until 1910, and then from 1939 to 1980 there is an increase in water discharges, then a decline until 1995 and then a decline until the end of the calculation period. At the same time, in 1913, 1933, 1980 and 1998, the highest minimum open-channel water discharges were observed for the entire observation period – 411, 421, 402 and 434 m<sup>3</sup>/s, respectively. The lowest minimum summer-autumn water flow was observed in 2015 and amounted to 48 m<sup>3</sup>/s.

Table 1 presents selected estimates of the main statistical parameters of the considered time series of minimum open channel flow for the period from 1877 to 2020.



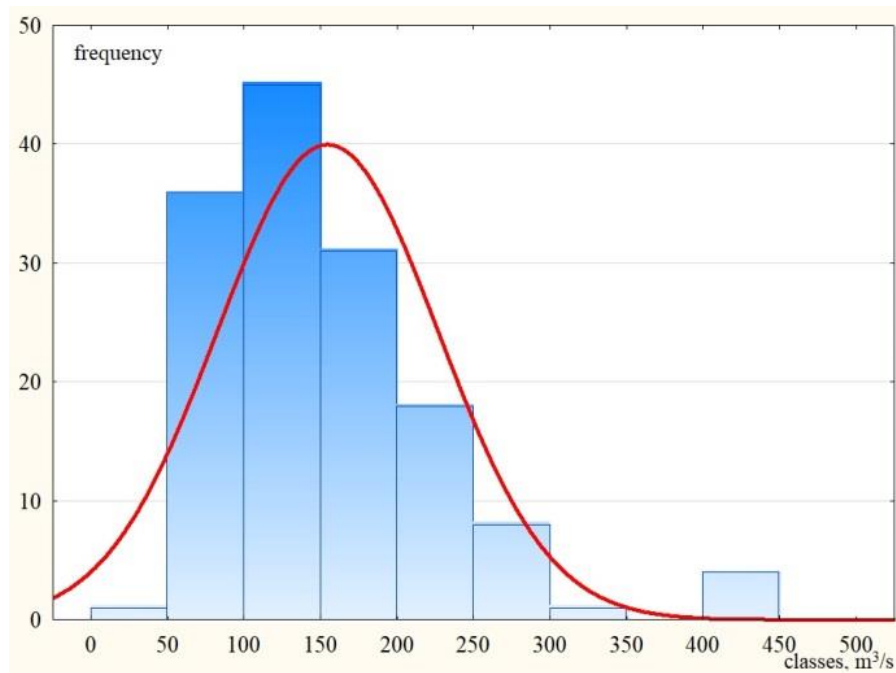
**Figure 1** – Long-term course of the open channel minimum runoff of the Pripyat River at the Mozyr gauging station

**Table 1** – Main statistical characteristics of the open channel minimum runoff of the Pripyat River at the Mozyr gauging station for the period 1877–2020

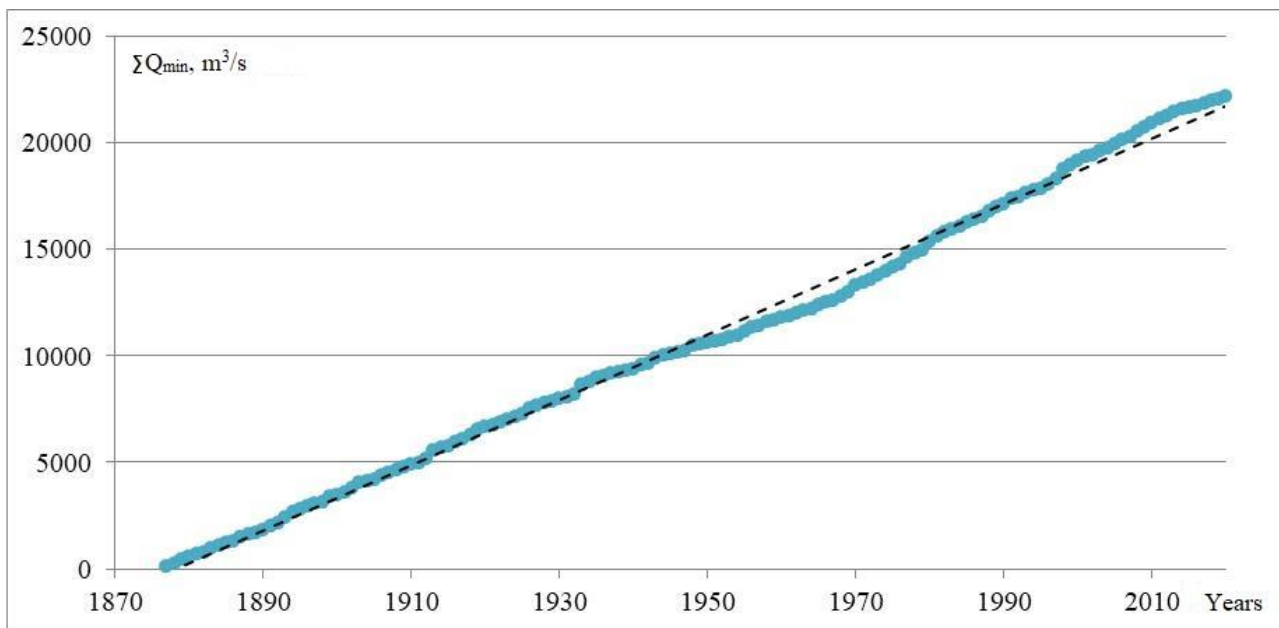
Average runoff, $\bar{Q}_{\min.s.}, \text{ m}^3/\text{s}$	Coefficients		
	of variation $C_v$	of asymmetry $C_s$	of autocorrelation $r(1)$
154	0.47	1.48	0.20

The empirical curves of availability correspond to a three-parameter gamma distribution at  $C_s = 3C_v$ . Since the probability distribution function of the annual runoff at such parameter estimates differs slightly from the normal distribution function, the use of parametric criteria for testing statistical hypotheses can be considered acceptable. The histogram constructed for the minimum open channel water discharges shows that the distribution is close to normal (Figure 2).

Let us consider the stability of sample statistics (averages, variation coefficients) when changing the averaging periods in relation to the open channel minimum runoff of the Pripyat River at the Mozyr gauging station for 1877–2020 ( $n = 144$  years). Testing for homogeneity of the open channel minimum runoff of the Pripyat River at the Mozyr gauging station using parametric criteria at a significance level of  $2\alpha = 5\%$  yielded the following results:  $t = 1.44 < t_{cr} = 1.98$  (the hypothesis on the significance of norms is not rejected) and  $F = 1.02 < F_{cr} = 1.48$  (the hypothesis on the ratio of variances is not rejected), which indicates the homogeneity of the time series. To confirm the homogeneity hypotheses, a summary integral curve of the open channel minimum runoff of the Pripyat River at the Mozyr gauging station was constructed [7]. As can be seen (Figure 3), there are no sharp turning points, which indicates the absence of fundamental changes in the studied characteristics of the water regime, although it has a slight bend in the years of active large-scale melioration.



**Figure 2** – Histogram of the distribution of the open channel minimum runoff of the Pripjat River at the Mozyr gauging station



**Figure 3** – Total integral curve of the open channel minimum runoff of the Pripjat River at the Mozyr gauging station

To study the impact of large-scale melioration and modern global warming, a comparative analysis of three intervals was performed: 1877–1964 – the period of minimal anthropogenic impacts; 1965–1986 – the period of active melioration impacts; 1987–2020 – the period of modern global warming. Table 2 shows the main statistical parameters of these intervals of the studied time series, and table 3 shows the matrix of Student’s and Fisher’s statistical criteria and their critical values.

**Table 2** – Main statistical parameters of the open channel minimum runoff of the Pripyat River at the Mozyr gauging station for different intervals

Period	Statistical parameters				
	<i>N</i> , years	$Q_{\min. s. av.}$ , m <sup>3</sup> /s	<i>C<sub>v</sub></i>	<i>C<sub>s</sub></i>	<i>r</i> (1)
1877–1964	88	139	0.50	1.84	0.06
1965–1987	23	187	0.37	1.57	0.14
1988–2020	52	171	0.42	1.31	0.37

The analysis of the average values of the open channel minimum water discharges for the three periods under consideration shows that the null hypothesis can be accepted only between the periods 1965–1987 and 1988–2020. For the periods 1877–1964 and 1965–1987, as well as 1877–1964 and 1988–2020, the null hypothesis of equality of means should be rejected. This is due to the massive melioration of Polesie, when centuries-old groundwater reserves were discharged, as evidenced by the highest river water discharges (Table 2). At the same time, there is no reason to reject the null hypothesis for variances. Thus, the nature of fluctuations in the open channel minimum water discharges of the Pripyat River at the Mozyr station is stable. No differences in autocorrelation coefficients were found using criterion statistics at the 5 % significance level [8].

**Table 3** – Statistical criteria (numerator) for different intervals of the time series of the open channel minimum runoff of the Pripyat River at the Mozyr gauging station and their critical values (denominator)

Period	1965–1987		1988–2020	
	<i>t</i> -test for means	<i>F</i> -criterion for dispersions	<i>t</i> -test for means	<i>F</i> -criterion for dispersions
1877–1964	<b>2.97/2.03</b>	1.02/1.67	<b>2.18/2.00</b>	1.10
1965–1987	–	–	0.87/2.01	1.07/1.97

*Note: Highlighted values are statistically significant.*

When studying the patterns of long-term fluctuations in river runoff, a joint analysis of the runoff dynamics and generalized characteristics of atmospheric circulation is of undoubted interest. The latter is usually represented by the classification of Vangengeim – Girs, based on three forms of circulation W (western), E (eastern) and C (meridional) [9]. This issue for meteorological series is considered in detail in the monograph by V. Loginov [10], where their complete analysis is given. Therefore, in this paper we will briefly dwell on the relationship between the open channel minimum runoff of the Pripyat River at the Mozyr gauging station and the type of atmospheric circulation. As can be seen from table 4, the range of changes in the characteristics of the minimum open channel runoff is quite significant and its extreme values are significantly greater (less) than similar values for the *n*-year periods of the original series.

The hypothesis about the homogeneity of the considered parameters of the open channel minimum runoff for periods with different circulation types was tested using the Student's and Fisher's tests. As the analysis showed, for some segments the differ-

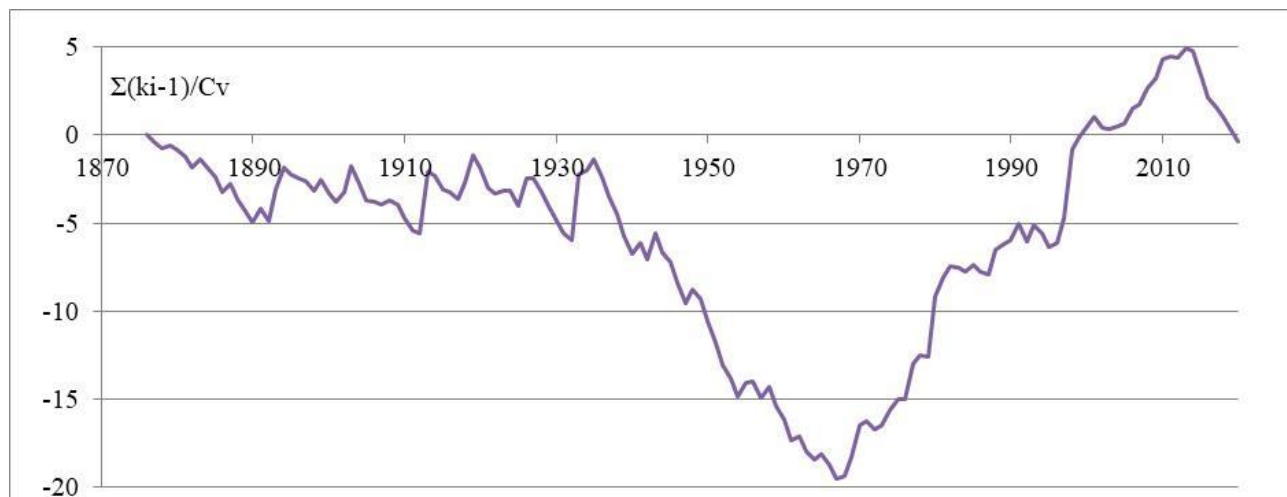
ences in the parameters are significant and can be considered statistically significant. According to the mathematical expectation, the following periods are statistically distinguishable: 1881–1890 (atmospheric circulation type C) from 1891–1928 (W), 1965–1988 (E) and 1989–2010 (W); 1891–1928 (W) from 1949–1964 (E+C), 1989–2010 (W) and 2011–2020 (E); 1940–1948 (C) and 1965–1988 (E); 1949–1964 (E+C) and 1989–2010 (W); 1965–1988 (E) and 1949–1964 (E+C) and 2011–2020 (E); 1989–2010 (W) and 2011–2020 (E). The period 1965–1988 (E) and 1989–2010 (W) are the periods with the highest water levels, so they differ from most other periods, including 1891–1928 (W) with a similar circulation type. If we arrange the periods of atmospheric circulation types in descending order of water content, the minimum water discharges of the open channel of the river Pripyat, the following picture is obtained: W – E – W – E – C – C – E – E+C. The considered segments are less heterogeneous in terms of dispersion. Here, the greatest variability is observed in the period 1929–1939 (E), which is statistically distinguishable from the periods: 1891–1928 (W), 1949–1964 (E+C), and 2011–2020 (E). For the remaining periods, statistically significant differences in the nature of runoff fluctuations were not established. Thus, the analyzed series of the open channel minimum runoff of the Pripyat River at the Mozyr gauging station is heterogeneous in terms of mathematical expectation and dispersion. At the same time, it can be assumed that for individual time periods with predominance of one or another type of atmospheric circulation, the stationary conditions are met. The transition from one state to another occurs in natural conditions under the influence of external climatic factors, which significantly change the relationship between precipitation and evaporation within the territory of the Pripyat basin. Long-term fluctuations in the flow of the Pripyat River are caused by climatic factors, the reason for which lies in the processes of large-scale moisture exchange in the ocean-atmosphere-land system [9].

**Table 4** – Main statistical parameters of the open channel minimum runoff of the Pripyat River at the Mozyr gauging station for different periods

Period	n, years	Type of atmospheric circulation	Statistical parameters					
			Q, m <sup>3</sup> /s	σ, m <sup>3</sup> /s	Cv	r(1)	α10, years	r
1881–1890	10	C	124	35.2	0.28	-0.36	-21.4	-0.28
1891–1928	38	W	157	66.3	0.42	-0.02	-5.26	-0.08
1929–1939	11	E	137	103	0.75	0.20	-57.2	-0.18
1940–1948	9	C	130	72.4	0.56	-0.47	-10.5	-0.04
1949–1964	16	E+C	110	48.6	0.44	-0.05	22.7	0.22
1965–1988	24	E	189	69.5	0.37	0.11	12.1	0.12
1989–2010	22	W	190	71.38	0.38	0.18	13.6	0.12
2011–2020	10	E	120	44.6	0.37	0.48	-80.9	-0.55

The concept of cyclicity of long-term fluctuations in the open channel minimum runoff was used in parallel with the concept of randomness. Cyclic fluctuations (cyclicity) are understood as the variability of the values of time series, which has a different degree of regularity, provided that there are mathematical expectations of the

parameters of these fluctuations. When analysing observation series, identifying the cyclicity of long-term fluctuations comes down to determining groups of years with increased and decreased runoff values. The most common way to identify trends in grouping years with relatively large and small flow values, which are due to correlations within the series or the presence of a cyclic trend, is a graphical analysis of the difference integral curve (Figure 4).



**Figure 4** – Normalized difference integral curve of the open channel minimum runoff of the Pripyat River at the Mozyr gauging station

The difficulty in using cycles to forecast runoff is their aperiodicity, since the phase, amplitude and duration of the cycle change without visible patterns. In addition, there is no consensus on the nature of these cycles: there is no objective method for identifying and analysing river water cycles. It is believed that cycles are caused either by the influence of external (cosmophysical factors), or by self-oscillatory processes in the Earth's atmosphere-hydrosphere system, or by the natural properties of any random sequence.

Based on samples of different lengths, statistical parameters of runoff were estimated and the degree of their change from sample to sample was studied. Samples were constructed as sections of the studied series, differing in the starting point and length. In particular, segments of the series were considered that differed in the degree of anthropogenic impact on runoff and the type of atmospheric circulation. In addition, statistical parameters were determined for segments of the original series, obtained as a result of the procedure of moving 20-year, 30-year, 35-year and 50-year averaging. The homogeneity of sample statistical parameters was tested using Student's and Fisher's test criteria [11].

As can be seen from figure 5 and 6, the extreme values of the mathematical expectation of different averaging periods have a significant range. This is due to the low-water period of the 30–70s of the last century, which introduces significant differences into the time series of the open channel minimum water discharges of the Pripyat River at the Mozyr station. Such differences in the parameter estimates indicate the use of the hypothesis of non-stationarity of the considered time series, which

is confirmed by testing the hypothesis of homogeneity of the considered statistical parameters for different smoothing periods, which, with a confidence probability of 5 %, discrepancies in these parameters can be recognized as statistically significant in all cases under consideration. Comparison of long-term sliding changes in averages and variances shows weak synchronicity in their changes.



**Figure 5** – Dynamics of moving averages for different periods of averaging the open channel minimum runoff of the Pripyat River at the Mozyr gauging station

The greatest dispersion is observed at the beginning of the 20<sup>th</sup> century to its middle, while the average values of runoff at this time were not extreme. At the same time, the high-water period of the last quarter of the 20<sup>th</sup> century coincided with increased runoff variability. High runoff variability in the 30–70s of the 20<sup>th</sup> century falls on both the years of high and low water content.

Due to the fact that both criteria give comparable results, the use of the cyclicity principle (quasi-periodicity) in the analysis and forecast of long-term fluctuations in the minimum summer-autumn runoff is acceptable.

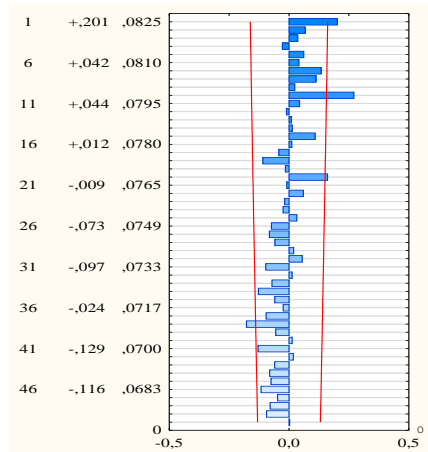
When the trend is not clearly expressed, it is necessary to consider together the sample autocorrelation (ACF) and partial autocorrelation (PACF) functions of the given process, with the help of which the nature of the change in the open channel minimum runoff of the rivers is determined. In this case, the following criteria for assessing the degree of non-stationarity of the process and choosing a model are used, given in [9, 12].

In our case, the ACF and PACF have a significant value at  $\tau = 1$  and  $\tau = 10$ , while all other values of their ordinates are statistically insignificant and are characterized by alternating positive and negative values (Figure 7).

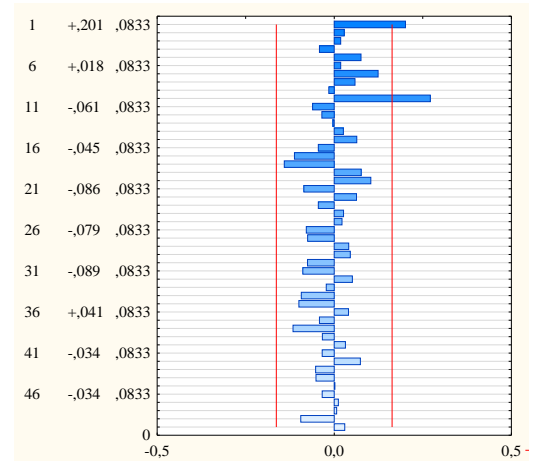


**Figure 6** – Dynamics of moving dispersions for different periods of averaging the open channel minimum runoff of the Pripjat River at the Mozyr gauging station

a)



b)



Therefore, the considered process of minimum open channel runoff can be identified by the AR(1) model, of the following type:

$$Q_{\min.s.}(t) = Q_{av.\min.s.} + r(1) \cdot [Q_{\min.s.}(t-1) - Q_{av.\min.s.}] + \xi(t), \quad (1)$$

where  $Q_{\min.s.}(t)$  and  $Q_{\min.s.}(t-1)$ ,  $m^3/s$  – open channel minimum runoff rates in the  $t$  and preceding  $(t-1)$  years;  $\xi(t)$  – Gaussian "white noise" with zero mean and  $\sigma_{\xi} = \sigma_Q \cdot \sqrt{1 - r(1)^2}$ .

In accordance with equation (1) for the time series of minimum water discharges of the open channel minimum runoff of the Pripjat River at the Mozyr gauging station at  $r(1) = 0.20$  and  $Q_{av.\min.s.} = 154 m^3/s$  (table 1), as well as  $\sigma_{\xi} = 72.4 m^3/s$  and  $\sigma_Q = 70.9 m^3/s$ .

$$Q_{\min.s.}(t) = 0.20 \cdot Q_{\min.s.}(t-1) + 123 + \xi(t).$$

The correlation coefficient between the open channel minimum runoff rates of the current year and the previous year is  $r = 0.20 > r^T(141, 5\%) = 0.16$ .

Of practical interest is the identification of patterns in the dynamics of the main hydrological parameters: smooth increase or decrease (monotonic trend), periodic changes (cyclic trend), constancy over some periods of time and sharp changes when moving from one segment to another (step trend). All these situations can be described by a polynomial approximation of the trend of the type [9]:

$$Q_{av}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \cdot \phi_i(t), \quad (2)$$

where  $\phi_1(t) \dots \phi_k(t)$  – given time functions;  $a_0 \dots a_k$  – regression coefficients.

Time functions can be either linear, power, exponential or logarithmic for a monotonic trend, or trigonometric for a cyclical trend and piecewise constant for a step trend. In all these cases, the parameters  $a_0 \dots a_k$  are estimated from the available series of observations  $X_1 \dots X_n$ .

The first term in the right-hand side of (2) can be interpreted as the runoff caused by the atmospheric precipitation of the previous year, accumulated by the river basin and discharged into the riverbed in the current year. In this case, the random component  $\xi(t)$  in (2) should obviously include that part of the runoff of the current year that is formed due to precipitation in the first half of this year. As a result, the following equations can be written [9]:

$$Q(t) = a \cdot Q(t-1) + b \cdot W_{pr}(t) + \xi(t_1), \quad (3)$$

$$Q(t) = c \cdot W_{pr}(t-1) + d \cdot W_{pr}(t) + \xi(t_2), \quad (4)$$

where  $W_{pr}(t)$  and  $W_{pr}(t-1)$  – precipitation of the first half of the current year and the entire volume of precipitation of the previous year.

With time series of annual values of precipitation and river runoff, the coefficients  $a, b, c, d$  from (4) and (5) can be determined using the multiple regression apparatus. With regard to the Pripyat basin at the Mozyr station for the open channel minimum water runoff rates, the following equations were obtained:

$$Q(t) = 0.059 \cdot Q(t-1) + 0.493 \cdot W_{pr}(t) + 71.02 + \xi(t_1), \quad (5)$$

$$Q(t) = 0.205 \cdot W_{pr}(t) + 0.120 \cdot W_{pr}(t-1) - 9.173 + \xi(t_2). \quad (6)$$

The multiple correlation coefficient for equation (5) is  $R = 0.48 > R^T(73, 5\%) = 0.231$ , and for equation (6) is  $R = 0.58 > R^T(73, 5\%) = 0.231$ .

We have attempted to describe the fluctuations in the minimum open channel water flow rates of the Pripyat River at the Mozyr station using a complex Markov model with a shift of up to 50 years. Regression-correlation analysis has shown that  $Q(t-1)$ ;  $Q(t-7)$  and  $Q(t-10)$  and special type of model can be used to construct the model:

$$Q(t) = 0.267 \cdot Q(t-1) + 0.220 \cdot Q(t-7) + 0.220 \cdot Q(t-10) + 43.5 + \xi(t). \quad (7)$$

The multiple correlation coefficient for equation (7) is  $R = 0.43 > R^T(94, 5\%) = 0.203$ .

#### 4 Conclusion

The conducted assessment of the degree of homogeneity of the main statistical parameters of the open channel minimum runoff of the of the Pripyat River at the

Mozyr gauging station for almost 150 years can be considered conditionally homogeneous, statistically significant changes in the open channel minimum flow occur only in certain intervals due to natural climatic changes in the hydrological cycle. When analyzing the patterns of long-term fluctuations in the open channel minimum runoff of the rivers, the use of methods of the theory of random processes should be combined with an analysis of the genesis of the process under consideration and the natural and economic factors that determine it, primarily climatic ones.

### References

1. Беларуская энцыклапедыя: у 18 т./ рэдкал.: Г. П. Пашкоў (гал. рэд.) [і інш.]. – Мінск : БелЭн, 2002. – Т. 15. – 552 с.
2. Волчек, А. А. Автоматизация гидрологических расчетов / А. А. Волчек // Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды: труды Международной научно-практической конференции / Брест. политехн. институт. – Биберах – Брест – Ноттингем, 1998. – С. 55–59.
3. Волчек, А. А. Пакет прикладных программ для определения расчетных характеристик речного стока / А. А. Волчек, С. И. Парфомук // Веснік Палескага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя прыродазнаўчых навук. – 2009. – № 1. – С. 22–30.
4. Логинов, В. Ф. Колебания годового воды р. Неман у г. Гродно / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек // Водные ресурсы. – 2006. – Т. 33, № 6. – С. 635–663.
5. Логинов, В. Ф. Практика применения статистических методов при анализе и прогнозе природных процессов / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, П. В. Шведовский. – Брест : БГТУ, 2004. – 301 с.
6. Лукьянец, О. И. Закономерности многолетней изменчивости водного стока рек бассейна р. Припять (в пределах Украины) и прогнозные оценки их водности / О. И. Лукьянец, С. А. Москаленко // Актуальные проблемы наук о Земле: использование природных ресурсов и сохранение окружающей среды : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. / Ин-т природопользования НАН Беларуси, Брест, гос. ун-т им. А. С. Пушкина, Брест, гос. техн. ун-т. – Брест : БрГУ, 2017. – Ч. 1. – С. 184–188.
7. Волчек, А. А. Гидрологические расчеты : учебное пособие / А. А. Волчек. – М. : КНОРУС, 2021. – 418 с.
8. Поллард, Дж. Справочник по вычислительным методам статистики / Дж. Поллард ; пер. с англ. В. С. Занадворова ; под ред. Е. М. Четыркина. – М. : Финансы и статистика, 1982. – 344 с.
9. Исмаилов, Г. Х. Анализ многолетних колебаний годового стока Волги / Г. Х. Исмаилов, В. М. Федоров // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28, № 5. – С. 517–525.
10. Логинов, В. Ф. Причины и следствия климатических изменений / В. Ф. Логинов. – Минск : Наука і тэхніка, 1992. – 319 с.
11. Христофоров, А. В. Теория случайных процессов в гидрологии / А. В. Христофоров. – М. : Из-во МГУ, 1994. – 141 с.
12. Бокс, Дж. Анализ временных рядов, прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М. : Мир, 1974. – Вып. 1. – 406 с.

**THE USE OF RENEWABLE ENERGY IN ARCHITECTURAL DESIGN:  
TAKING CHINA AS AN EXAMPLE AND ITS IMPLICATIONS  
FOR BELARUS**

*Yang Zhuxi*

*PhD Student, Belarusian State University, Minsk, Belarus,  
e-mail: yangzhuxi21@gmail.com*

**Abstract**

With the development of science and social progress, the research on renewable energy has been continuously deepened and gradually penetrated into the field of construction industry. The application of renewable energy in the construction industry can effectively promote the sustainable and stable development of the construction industry. This paper mainly explores the application of renewable energy in the architectural design process. By exploring the use methods and application situation of renewable energy in the field of architectural design in China, it is expected to provide some research value and reference for the renewable sustainable development of the Belarusian construction industry.

**Keywords:** Renewable energy, sustainability, architectural design, application and development.

**Introduction**

As an emerging energy type, renewable energy has outstanding advantages over traditional fossil energy. The application of renewable energy in the architectural design industry can effectively change the current problems of high energy consumption and poor environmental performance in the construction industry, and can provide sufficient power support for the low-carbon and environmentally friendly development of the construction industry, thereby promoting the progress of a resource-saving and environmentally friendly society.

**Advantages of renewable energy applications in China's architectural design industry**

The first is the energy-saving effect. The application of renewable energy in the field of architectural design can have a significant energy-saving effect. Most renewable energy needs to be converted into other energy types required by the building through electrical energy conversion.

Through the efficient use of renewable energy in the process of architectural design, it is necessary to combine the actual situation of the construction project to calculate the required energy type and the actual amount of energy resources required to maintain the operation of the system, so as to replace the traditional energy resources that are more polluting to the environment and have high energy consumption, reduce the energy resource consumption in the use of construction projects, and achieve the development goal of energy conservation and emission reduction.

The second is that it can provide a more comfortable and environmentally friendly construction and living environment. Environmental protection issues have always been a key issue in China's social and economic development. For the high-pollution, high-energy-consuming construction industry, it is necessary to strengthen the application of environmental protection concepts and the research on green buildings, and achieve sustainable development of buildings through the organic combination of green buildings and renewable energy.

In modern building design and construction, the application of renewable energy can provide residents with a more comfortable and healthy living environment. With the development of social economy and the improvement of people's living standards, people's aesthetic ability and requirements for living environment are getting higher and higher, and traditional construction methods can no longer meet people's growing material and cultural needs. Therefore, it is necessary to strengthen the research and development and application of renewable energy, make full use of geothermal energy, solar energy, tidal energy and wind energy through the promotion of renewable energy, reduce the damage to the surrounding environment caused by additional products in the process of energy production and use, and maintain ecological balance.

Third, it will provide higher economic benefits. Renewable energy has the advantages of being renewable and relatively wide in coverage, and has very high economic value. In the actual use of engineering and energy resource conversion, it does not require too much capital cost to achieve the effective use of renewable energy.

However, when applying renewable energy in architectural design, it should be noted that a certain amount of capital must be invested in advance in the initial use of renewable energy, such as introducing advanced production technology and hardware equipment, so as to maximize the value and advantages of renewable energy. At the same time, it is also necessary to provide sufficient talent reserves and talent support, continuously innovate renewable energy collection technology and production technology, and ensure the safety of renewable energy use and supply.

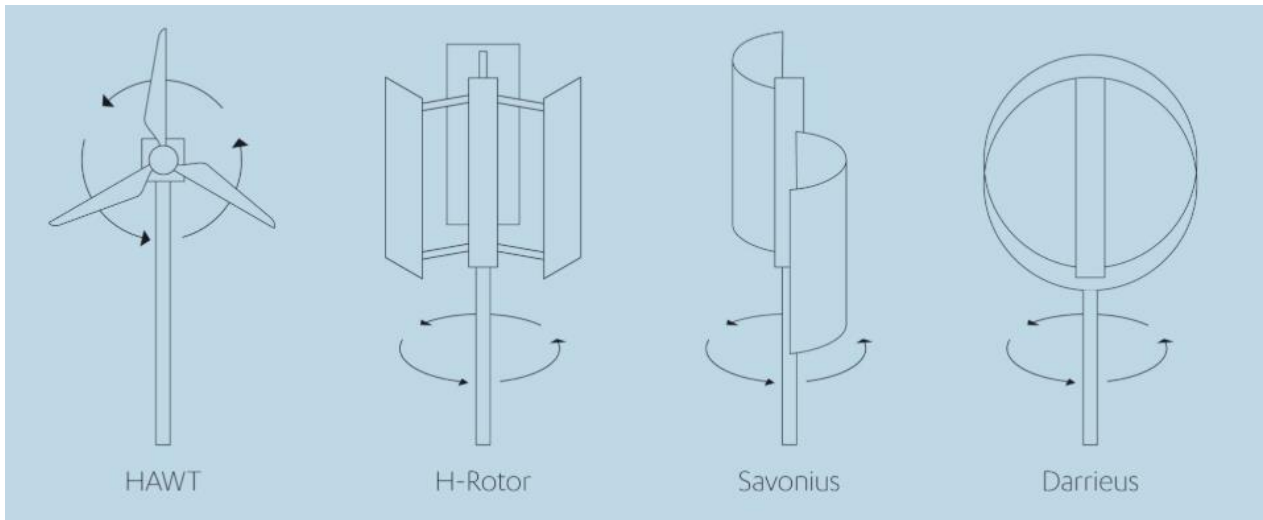
### **Application of renewable energy in architectural design in China**

First is the application of wind energy.

As an important renewable energy source, wind energy is widely used in the current field of wind power generation in China. The application of wind energy in buildings can mainly be achieved by utilizing indoor ventilation to form good natural ventilation, thereby improving indoor temperature and humidity, removing indoor pollutants, and promoting indoor air flow. This can effectively reduce the application of air conditioning systems and save electricity.

China has a vast land area, and there are large differences in the geographical environment between different regions. Therefore, in the process of architectural design, it is necessary to reasonably set the type of building in combination with local climatic conditions and wind energy characteristics, and require the building monomer to have good ventilation effect. By utilizing the pressure difference between the back and sunny sides of the building to drive the air, increase air convection inside the building to form air flow.

As the technology that supports wind power matures, concerns about wind turbines interfering with wildlife and radar are being addressed through research as blade technology continues to improve. Innovations such as offshore wind and floating foundations are advancing rapidly, with the potential to deliver large amounts of wind energy in places where deployments were unthinkable not long ago. Even familiar wind turbine models may be tweaked as researchers continue to explore the potential of horizontal axis wind turbines (HAWTs) and vortices (Figure 1).



**Figure 1** – Types of vertical axis wind turbines

In some dense building groups, the air flow is relatively poor, so the efficiency of indoor air exchange can be improved by installing wind capture devices in the building to increase internal air convection.

Solar energy resources are typical representatives in the application of renewable energy. In the current Chinese society, energy converted from solar energy is widely used in all walks of life, effectively saving the use of fossil energy.

Solar energy itself has the advantages of abundant reserves, clean and pollution-free, renewable, directly developed and utilized, and no need for transportation and mining. China has very rich solar energy resources, which can create a good environment for the application of solar energy resources in the construction field. The utilization technology of solar energy in the current construction field in China is relatively mature. The most common way to utilize solar energy is the solar water heating system. By converting solar energy into thermal energy and storing it for water heating, people can obtain the hot water needed in their lives and reduce the consumption of energy resources (Figure 2).

The most important component of the solar water heating system is the collector, which mainly includes two types: flat-plate collector and vacuum collector. The flat-plate structure device is safe and reliable in operation and has a good pressure-bearing effect. The vacuum tube collector has good thermal insulation performance, simple structure, and high efficiency at relatively low temperatures. However, the pipe is more likely to break and the structural pressure-bearing capacity is poor, while the flat-plate collector is more suitable for the low temperature range and has a relatively low efficiency in the high temperature section. With the continuous develop-

ment of science and technology and the accelerating process of development and utilization of renewable energy resources, various emerging materials are directly used in the utilization of solar energy and the design and development of solar collectors, which can greatly improve the thermal insulation performance of solar collectors, have the advantages of high heat collection efficiency, fast speed and low cost, and can prevent heat conduction.



**Figure 2** – Curved surface heat absorption solar water heater

Finally, the application of bioenergy.

Bioenergy is a relatively new type of renewable energy. It is an application form that treats domestic waste and construction waste during the operation of buildings and turns waste into treasure. In the past, people in China usually burned or landfilled domestic resources and construction resources, which not only caused secondary pollution, but also wasted a lot of public resources. Combined with biotechnology, effective classification and application of construction waste and domestic waste, and using these wastes as raw materials for the production of renewable energy such as biogas can achieve resource recycling and reduce energy resource consumption. At the same time, this operation can also prevent damage to the surrounding environment during garbage disposal and improve the greenness and environmental protection of buildings.

## Conclusion and Recommendations

What designers need to pay attention to during the building design process is that the building fresh air system needs to be well matched with the ventilation equipment to prevent the air conditioning system from using too much power and causing waste of resources. The optimization and upgrading of building ventilation design should be continuously strengthened, and the advantages and disadvantages of local wind energy conditions should be clarified in combination with local meteorological data, and targeted measures should be taken to implement the wind energy use plan. In the process of building planning, the combination and connection between the building group and the building monomer volume should be strengthened in combination with the wind direction characteristics of the project area; attention should be paid to the orientation and spacing of the building, and the building enclosure structure should be carefully analyzed. The height and area of the building doors and windows should be reasonably designed, and the door and window structure should be used to make the indoor air circulation effect good.

In the process of solar energy application, architectural designers need to pay attention not only to the research progress of current new products, but also to comprehensively consider the local climate conditions and solar energy radiation conditions, and reasonably install solar energy devices. Energy resources should be effectively used to reduce energy loss, and the orientation and distance of buildings should be reasonably planned to maximize the use of solar energy resources.

Designers of construction units need to comprehensively consider the weight, type and treatment methods of construction waste, combine the actual construction requirements and operational needs of construction projects, match the operation system and development system for comprehensive utilization of bioenergy, rationally utilize construction waste and reduce the waste of energy resources.

## References

1. Chen, Fengfang. Research on the application of renewable energy in architectural design / Fengfang Chen // *Engineering Technology Research*. – 2016. – P. 73–74.
2. Huang, Jing. Utilization of renewable energy in architectural design / Jing Huang // *Proceedings of 2023 Seminar on New Engineering Technologies and Methods*. – 2023. – P. 97–98.
3. He, Daren. Residential design integrating prefabricated buildings and renewable energy / Daren He // *Housing*. – 2023. – P. 99–102.
4. Yan, Zhipeng. Research on the utilization of renewable energy in architectural design / Zhipeng Yan // *Housing*. – 2022. – P. 186–188.
5. Yang, Le. A brief analysis of the utilization path of renewable energy in architectural design / Le Yang // *Real Estate*. – 2019. – P. 38.
6. Zhang, Zhongxiao. On the application of renewable energy in architectural design / Zhongxiao Zhang // *Chinese and Foreign Entrepreneurs*. – 2019. – P. 88.
7. Kou, Xingting. A preliminary study on the application of renewable energy in the low-energy architectural design of rural houses in Weifang / Xingting Kou, Zijuan Wang // *Building Materials and Decoration*. – 2017. – P. 85–86.
8. Xu, Xinming. A brief discussion on the role of renewable energy in architectural design and key points of implementation / Xinming Xu // *Science and Technology Outlook*. – 2015. – Vol. 25. – P. 18.

## ВЛИЯНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ДИЗАЙНА НА УСТОЙЧИВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

*В. В. Буйновская<sup>1</sup>, И. И. Полоз<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Студентка ФТУГ, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: wika1234539@gmail.com*

<sup>2</sup> *Доцент кафедры промышленного дизайна и упаковки, ФТУГ, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: uira@list.ru*

### **Реферат**

В статье рассматривается влияние экологического дизайна на устойчивое строительство. Проанализированы современные экологически чистые материалы, энергосберегающие технологии и рациональные проектные решения, способствующие повышению энергоэффективности и экологической безопасности объектов. Представлен собственный дизайн-проект жилого дома с применением зеленой крыши и экологически устойчивых материалов, который иллюстрирует практическую реализацию принципов экологического дизайна.

**Ключевые слова:** экодизайн, устойчивое строительство, энергоэффективность, экологическая безопасность.

### **Введение**

Экологичный дизайн и устойчивое строительство в последние десятилетия стали важными направлениями в строительной индустрии, подчеркивающими необходимость снижения негативного воздействия на окружающую среду [1–2]. Устойчивое строительство предполагает создание зданий и сооружений с минимальным воздействием на окружающую среду. Они предполагают использование инновационных технологий, натуральных и переработанных материалов, а также эффективные методы строительства и дизайна, направленные на уменьшение энергопотребления, углеродного следа и ресурсозатрат.

Экологический дизайн выступает как ключевой элемент устойчивого строительства, позволяя интегрировать принципы экологии уже на этапе проектирования и тем самым снижать негативное воздействие будущих построек на окружающую среду. Так, экологический дизайн как интегративный подход направлен на создание архитектурных и инженерных решений, минимизирующих энергопотребление, использование невозобновляемых материалов и образование отходов. Его применение способствует повышению энергоэффективности зданий, улучшению микроклимата и качества жизни, а также снижению выбросов парниковых газов.

В последние годы экологичный дизайн получил новый импульс благодаря интеграции цифровых технологий и повышению спроса на экологически безопасные и энергоэффективные пространства [3]. Строительные компании стали внедрять BIM-технологии (информационное моделирование зданий) для проектирования энергоэффективных зданий с оптимизацией всех этапов их жизнен-

ного цикла. Применение систем искусственного интеллекта и анализа данных помогает выбирать материалы и планировать интерьеры таким образом, чтобы минимизировать углеродный след и повысить энергоэффективность.

Строительная отрасль является одним из основных источников выбросов углерода и потребления ресурсов, что делает необходимость внедрения устойчивых практик в проектирование и строительство зданий особенно важной. В связи с этим применение принципов экологического дизайна становится не только актуальным, но и необходимым для достижения целей устойчивого развития.

Целью данной научной статьи является анализ влияния экологического дизайна на устойчивое строительство, а также разработка экологического дизайн-проекта здания.

### **Условия и методы проведения исследований**

В рамках данного исследования был проведен детальный анализ существующих зданий и сооружений, спроектированных с учетом принципов экологического дизайна. Основное внимание уделялось архитектурным решениям, использованию устойчивых материалов и технологий, а также интеграции энергоэффективных систем.

Для разработки экологического дизайн-проекта здания было использовано специализированное программное обеспечение MyHome3D. Данное ПО позволяет создавать трехмерные модели зданий, что обеспечивает визуализацию проектируемых решений и позволяет детально анализировать их функциональность и эстетику. С помощью MyHome3D была разработана трехмерная модель здания, в которой учитывались все элементы экологического дизайна, такие как расположение окон для максимального использования солнечного света, выбор материалов с низким углеродным следом и интеграция зеленых технологий.

Важным аспектом исследования является сравнительный анализ различных строительных материалов и технологий с точки зрения их экологичности и устойчивости. В этом контексте были рассмотрены следующие группы материалов:

- возобновляемые материалы. Рассматривались древесина, бамбук и другие натуральные материалы, которые обладают низким углеродным следом и высокой способностью к переработке;

- вторичные материальные ресурсы. Оценивались материалы, полученные из вторичных ресурсов, такие как переработанный бетон и стекло, которые уменьшают нагрузку на окружающую среду и способствуют устойчивому строительству;

- новые технологии. Анализовались современные технологии, такие как использование биоматериалов, которые обладают высокой прочностью и минимальным воздействием на экологию.

Сравнительный анализ проводился на основе таких критериев, как уровень углеродных выбросов при производстве и использовании материалов, возможность переработки и повторного использования, долговечность и устойчивость к внешним факторам, а также эстетические и функциональные характеристики.

## Основная часть

Основные принципы экологического дизайна представляют собой комплекс взаимосвязанных подходов, направленных на снижение негативного воздействия зданий на окружающую среду и повышение их устойчивости. Ключевыми аспектами являются энергоэффективность, экологически чистые материалы и управление водными ресурсами [1].

Первым принципом является применение экологически чистых материалов, что подразумевает выбор ресурсов с минимальным экологическим следом на всех этапах жизненного цикла – от добычи сырья до утилизации. К таким материалам относятся натуральные и возобновляемые ресурсы, например, древесина, бамбук, глина, а также экологичный бетон и синтетические материалы, изготовленные из переработанных отходов. Использование данных материалов способствует снижению выбросов парниковых газов и уменьшению накопления отходов [4].

Второй принцип связан с проектированием зданий, ориентированным на минимизацию энергопотребления. Это достигается посредством интеграции возобновляемых источников энергии, таких как солнечные батареи, ветрогенераторы и геотермальные установки. Применение данных технологий позволяет существенно сократить зависимость от ископаемых энергоносителей и снизить углеродный след объектов [5].

Третий принцип направлен на минимизацию потребления воды и сохранение водных ресурсов. Внедрение технологий сбора и повторного использования дождевой воды, а также применение водосберегающих устройств способствуют эффективному управлению водными ресурсами и снижению нагрузки на городские системы водоснабжения [6].

Для иллюстрации практического воплощения перечисленных принципов экологического дизайна были выбраны два объекта – жилой и коммерческий комплекс One Central Park в Сиднее и Музей будущего в Дубае. Сравнительный анализ этих сооружений демонстрирует различные подходы к реализации устойчивых архитектурных решений.

One Central Park представляет собой пример интеграции природных элементов и современных технологий. Комплекс характеризуется обширными зелеными зонами, которые способствуют созданию благоприятной микросреды и повышают качество жизни обитателей. Кроме того, здание оснащено солнечными панелями, что снижает углеродный след, а системы сбора и повторного использования дождевой воды обеспечивают эффективное управление водными ресурсами (рисунок 1).

В отличие от этого, Музей будущего акцентирует внимание на инновационных материалах и энергоэффективности (рисунок 2). Оптимизированная форма здания способствует уменьшению тепловой нагрузки, улучшению естественной вентиляции и освещения, что снижает потребление энергии. Использование солнечных панелей дополнительно способствует достижению энергетической автономности объекта.



**Рисунок 1 – One Central Park**



**Рисунок 2 – Музей будущего**

Оба проекта демонстрируют применение экологически чистых материалов, что снижает негативное воздействие на окружающую среду и способствует устойчивому развитию. Таким образом, данные примеры подтверждают, что экологический дизайн может реализовываться как через использование природных ресурсов, так и посредством внедрения передовых технологий, формируя основу для устойчивого строительства будущего.

На основании анализа двух объектов был разработан дизайн-проект жилого дома с применением экологически чистых материалов и внедрением технологии зеленой крыши (рисунок 3).



**Рисунок 3** – Дизайн-проект жилого дома с экологически устойчивыми решениями

Концепция здания ориентирована на гармоничное включение в природное окружение, при этом дом должен обладать экологической безопасностью, энергоэффективностью и сохранять органичность природных форм. Архитектурная композиция предусматривает обтекаемую крышу с плавными очертаниями, что улучшает аэродинамические характеристики и обеспечивает эффективный отвод дождевых вод.

Зеленая крыша представлена комплексной конструкцией, состоящей из следующих элементов: деревянного основания, пароизоляционного и теплоизоляционного слоев, гидроизоляционного слоя на основе натурального каучука, корнезащитного барьера, дренажного слоя из переработанных материалов, фильтрующего слоя, субстрата, устойчивого к засушливым условиям, и растительного покрова. Такая конструкция способствует повышению теплоизоляционных свойств здания, улучшению микроклимата прилегающей территории и снижению эффекта городского «теплового острова».

В качестве фасадного материала использован экологический бетон, обладающий высокой прочностью и долговечностью, состоящий из натуральных компонентов, обеспечивающий паропроницаемость и способствующий снижению энергозатрат на отопление и охлаждение помещений.

Для изготовления оконных рам, пола и потолка использовали дерево – экологически чистый материал, который не выделяет вредных веществ, обеспечивает оптимальное естественное освещение, обладает высокими тепло- и звукоизоляционными характеристиками, а при надлежащей обработке сохраняет эксплуатационные свойства на протяжении длительного времени.

Стены отделаны известковой штукатуркой, характеризующейся хорошей адгезией, устойчивостью к температурным перепадам, долговечностью, паропроницаемостью и экологической безопасностью.

Окружающий ландшафт включает локальные засухоустойчивые растения и кустарники, не требующие интенсивного полива, что способствует поддержанию биоразнообразия и рациональному использованию водных ресурсов. Ландшафтные решения способствуют задержке влаги и предотвращению эрозионных процессов. Для обеспечения автономного энергоснабжения на территории размещены ветрогенераторы и солнечные панели, что снижает зависимость от традиционных источников энергии и способствует охране окружающей среды. Совместное использование ветровой и солнечной энергии повышает эффективность использования возобновляемых ресурсов.

Таким образом, разработанный дизайн-проект демонстрирует реализацию принципов устойчивого строительства, объединяя архитектурную эстетику, органичный дизайн, функциональность и экологическую ответственность. Это способствует снижению углеродного следа и повышению качества жизни пользователей. Влияние экологического дизайна на устойчивое строительство не только снижает экологическую нагрузку, но и представляет собой перспективное направление, обеспечивающее экономическую целесообразность и улучшение социального благополучия.

#### **Список использованных источников**

1. Сейидов, А. Устойчивое строительство и экодизайн: тенденции, проблемы и решения / А. Сейидов, О. Дурдыев // Вестник науки. – 2024. – Т. 4, № 9 (78). – С. 476–479.
2. Современные энергосберегающие технологии и способы энергосбережения в строительстве / Е. В. Горбанева, С. В. Еськова, Н. В. Каньшина, Ю. В. Шевченко // Организация строительного производства : материалы II Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 04–05 февраля 2020 г. – СПб. : СПбГАСУ, 2020. – С. 144–151.
3. Сычев, С. А. Эко технологии строительства с учетом критериев энергоэффективного зданий / С. А. Сычев // Science Time. – 2014. – № 10. – С. 343–349.
4. Экологически безопасные технологии производства: общие принципы. – URL: <https://ecofog.pro/2025/05/07/ekologicheski-bezopasnye-tehnologii-proizvodstva-obshhie-principy> (дата обращения: 21.05.2025).
5. Тарасенко, В. Н. Энергосберегающие технологии в проектировании и строительстве / В. Н. Тарасенко, М. А. Слободянский // Вектор ГеоНаук. – 2020. – № 4. – С. 21–25.
6. Зеленые технологии в строительстве: водоснабжение и водоотведение с учетом экологии. – URL: <https://p-project.by/news/zelenye-texnologii-v-stroitelstve-vodosnabzhenie-i-vodootvedenie-s-uchetom-ekologii> (дата обращения: 21.05.2025).

## ВЫБОР МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ГАЗО-ЖИДКОСТНОЙ ДИСПЕРСИИ ПРИ ВВЕДЕНИИ СРАВНИТЕЛЬНО ДОРОГОСТОЯЩИХ ГАЗОВ

*А. А. Волчек<sup>1</sup>, Г. О. Наумчик<sup>2</sup>, В. С. Белов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Д. г. н., профессор, профессор кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

<sup>2</sup> К. т. н., доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gonaumchik@bstu.by

<sup>3</sup> Аспирант, УО «Брестский государственный технический университет», инженер–проектировщик, ЧУП «Сифания–экотехника», Брест, Беларусь, e-mail: belovadim@mail.ru

### Реферат

В статье рассмотрены применяемые на практике методы получения газовых дисперсий. Описано оригинальное устройство для гидродинамического диспергирования газа высокотурбулентным потоком жидкости с целью получения мелкой газовой дисперсии, позволяющее эффективно вводить сравнительно дорогостоящие газы (кислород, озон) в обрабатываемую жидкость.

**Ключевые слова:** диспергация, аэрация, газо-жидкостная дисперсия, диспергатор.

## CHOICE OF METHOD FOR OBTAINING GAS-LIQUID DISPERSION WHEN INTRODUCING COMPARATIVELY EXPENSIVE GASES

*A. A. Volchek, G. O. Naumchik, V. S. Belov*

### Abstract

The article discusses the methods used in practice to obtain gas dispersions. An original device for hydrodynamic gas dispersion by a highly turbulent liquid flow is described in order to obtain a fine gas dispersion, which allows for the effective introduction of relatively expensive gases (oxygen, ozone) into the liquid being processed.

**Keywords:** dispersion, aeration, gas-liquid dispersion, dispersant.

### Введение

При обработке природных и сточных вод, а также в различных отраслях промышленного производства и сельского хозяйства часто возникает потребность получения мелких газовых дисперсий со средним диаметром пузырьков менее 1 мм [1–5]. С уменьшением диаметра пузырьков возрастает межфазная поверхность и, следовательно, увеличивается эффективность следующих про-

цессов: растворение озоносодержащих газовых смесей в водных системах, растворение кислорода в окситенках и в прудах при промышленном рыбоводстве, процесс очистки воды методом флотации, процесс пенной сепарации на горно-обогатительных предприятиях и т. д. Выполнены многочисленные исследования и разработки в данной области [1–3, 5–7], однако задача получения мелких газовых дисперсий до настоящего времени решена не полностью, поэтому исследования в данной области остаются актуальными [1, 2, 6, 7].

Методы получения диспергированной газовой фазы (ДГФ) классифицируют следующим образом [7]:

1. Пневматический метод (барботирование), при котором подача газа осуществляется через затопленные пористые перегородки.

2. Механический метод, при котором диспергирование газа производится при помощи мешалок различных конструкций.

3. Гидравлический метод, при котором используются эжектирующее и диспергирующее действие струй жидкости.

4. Физико-химический метод, основан на газировании жидкости, происходит за счет выделения газа из пересыщенного раствора при изменении его растворимости, а также при протекании химической или электрохимической реакции.

Существуют комбинированные методы получения ДГФ – пневмомеханический и пневмогидравлический [8–12].

### **Анализ методов диспергирования**

Сущность процесса пневматической диспергации заключается в пропуске газа через затопленные диспергирующие устройства (барботёры), расположенные, как правило, у дна камеры диспергирования [4]. Обычно в качестве диспергирующих устройств применяют перфорированные или пористые элементы [13]. С помощью диспергирующих устройств подаваемый газ дробится на пузырьки, которые распределяются в объеме жидкости и служат источником насыщения жидкости газом, а также вызывают направленную циркуляцию жидкости [4, 13].

Пневматические диспергаторы можно применять как в открытых, так и в закрытых сооружениях. По заглублению диспергаторы пневматической системы подразделяют на диспергаторы малого (до 1,5 м), среднего погружения (1,8...6,0 м) и глубинные диспергаторы (глубина погружения более 6,0 м). Пневматический метод классифицируют по характеру диспергационной полосы. Различают диспергацию сплошной полосой и очаговую. Диспергация с помощью фильтров при их сплошной укладке относится к диспергации сплошной полосой, а диспергация с помощью статических или трубных диспергаторов относится к очаговой. По давлению газа на выходе из устройства различают системы низкого (до 9,8 кПа), среднего (от 9,8 до 49 кПа) и высокого (свыше 49 кПа) давления [4, 7].

Для подачи газа в системы высокого давления используют компрессоры, в системы среднего давления газ подается газодувками, в системах низкого давления используют высоконапорные вентиляторы [4].

По размеру образующихся на выходе из распределительных устройств пузырьков газа пневматические диспергаторы подразделяются на четыре типа: беспузырчатые, мелкопузырчатые, среднепузырчатые и крупнопузырчатые. В беспузырчатой системе диспергации газ растворяется полностью или имеет пузырьки размером меньше 0,25 мм. В мелкопузырчатой системе должны находиться пузырьки диаметром 1...4 мм, в среднепузырчатой – диаметром 5...10 мм и в крупнопузырчатой – диаметром более 10 мм [4, 7].

В беспузырчатой системе аэрации газ (воздух, озон или кислород) растворяется полностью или имеет пузырьки размером меньше 0,25 мм. Беспузырчатые диспергаторы представляют собой перфорированные пластины с отверстиями или порами размером меньше 0,25 мм. Применение беспузырчатой системы аэрации наиболее эффективно, так как чем мельче размер пузырьков, тем выше площадь поверхности раздела фаз «газ-жидкость», но необходимо уделять больше внимания эксплуатации диффузоров [4, 6, 7, 13]. Такие системы аэрации не получили широкое распространение ввиду сложности получения пузырьков воздуха размером 0,25 мм, из-за коалесценции пузырьков, происходящей даже при выходе газа из пластин с отверстиями или порами, имеющими средний диаметр менее 0,25 мм [6, 7].

К мелкопузырчатым диспергаторам относятся тканевые (рамные, тарельчатые, решетчатые), пластиковые (диффузоры, сарановые трубки и чехлы из пластмассовых тканей), металлические диффузоры (клапанные и керамические). В качестве керамических диспергаторов используют однослойные и двухслойные фильтросные пластины, керамические трубы, диффузоры в виде куполов, дисков и грибов [13]. К среднепузырчатым диспергаторам принадлежат перфорированные трубы, спарджеры, щелевые, купольные с седельчатым клапаном и тарельчатые диспергаторы, подводные диспергаторы с рассеивающим распределителем, цилиндрические диспергаторы с кольцевым направляющим конусом, пневматические диспергаторы с направляющим кожухом, диспергаторы-эрлифты и т. д. Крупнопузырчатыми являются диспергаторы в виде открытых снизу вертикальных труб диаметром 50 мм или сопел, а также статические и трубные спиральные диспергаторы, трубные диспергаторы с чередующимися пластинчатыми элементами [4, 13].

Пневматический (барботажный) метод обладает наибольшей энергетической эффективностью из всех методов получения газо-жидкостных дисперсий [3, 4, 6, 7]. Большим преимуществом данного метода является отсутствие движущихся частей, простая конструкция сооружений, невысокое требуемое давление газа (0,05...0,15 МПа), возможность работы в широком диапазоне удельного расхода газа [4, 6, 7, 13]. Основными недостатками пневматического диспергирования газа является возможность забивания пор и отверстий барботеров механическими загрязнениями (при газировании загрязненных вод) и крупный средний диаметр пузырьков (2...3 мм) при их высокой полидисперсности [2, 4, 6, 7]. Причем уменьшение диаметра отверстий или пор диспергатора не приводит к заметному снижению среднего диаметра пузырьков газа. Данная закономерность обусловлена балансом сил при формировании пузырьков газа [2, 4, 6, 7].

Сущность процесса механической диспергации состоит в вовлечении в жидкость газа при помощи ротора. Это вовлечение может осуществляться как за

счет разбрызгивания ротором жидкости в виде тонкой пленки, так и за счет захвата воздуха при гидравлическом прыжке, а также за счет разрежения в зоне действия механического диспергатора. В зависимости от типа применяемого диспергатора один из способов вовлечения превалирует над другим [6, 7].

Для механического диспергирования газовой фазы применяют различного вида аппараты, снабженные мешалками с лопастями, которые попеременно то погружаются в жидкость, то выходят из нее [6, 7]. Мешалки могут быть вращающимися или движущимися возвратно-поступательно. Однако в чистом виде метод механического диспергирования газовой фазы применяют редко, т. к. «замешивание» газовой фазы в жидкую малоэффективно [6, 7].

На практике чаще всего используют комбинированный метод, заключающийся в том, что газы вводятся барботажным методом в виде пузырей с последующим их дополнительным диспергированием мешалками [6–9]. При этом газовая фаза образуется либо при истечении газов из барботера, расположенного ниже мешалки, либо газ падает прямо в мешалку, снабженную отверстиями [8, 9]. Такого типа устройства особенно часто используют для флотационной очистки жидкостей или при флотационном обогащении минералов [1, 2, 16].

Дальнейшего диспергирования грубодисперсной газовой эмульсии можно добиться продавливанием ее через тонкие капилляры, пористые пластинки или узкие щели. В отдельных случаях можно применять встряхивания жидкости в сосуде, часть объема которого заполнена газовой фазой. Возможно также использовать и другие методы, применяемые для получения эмульсий типа «жидкость-жидкость» [2, 6, 7].

Метод механического диспергирования применяют только для получения газовых эмульсий в маловязкой дисперсной среде. По мере роста вязкости увеличение гидродинамического сопротивления и уменьшение скоростей потоков резко снижают эффективность данного метода [6, 7].

Механических диспергаторы наиболее часто применяют в малых и средних по производительности очистных сооружениях, а также в водоемах с целью улучшения их самоочищающей способности, в рыбоводческих прудах и при доочистке биологически очищенных сточных вод в биологических прудах [6, 7].

Механический метод получения ДГФ является самым энергозатратным в сравнении с другими методами, поскольку в данном процессе основная доля энергии тратится не на диспергирование газовой фазы, а на преодоление сил гидравлического сопротивления и приведение жидкости в движение. Обычно только 0,2...2 % от общих затрат энергии расходуется на дробление пузырьков газа [6, 7]. Также получение мелких пузырьков газа механическим диспергированием осложнено одновременным протеканием процесса их коалесценции (укрупнения), при этом устанавливается некоторый средний диаметр пузырьков, соответствующий гидродинамической обстановке в системе. Обычно средний диаметр пузырьков при механическом диспергировании составляет 3...4 мм [2, 4, 6, 7], для получения более мелких пузырьков необходимо в газожидкостную систему добавлять ПАВ, что часто неприемлемо.

Гидравлический метод диспергации основан на насыщении жидкости газом за счёт захвата газа падающими струями (каплями) жидкости или за счёт захвата газа жидкостью, движущейся через суженные участки инжектирующих

устройств. К разновидностям данного метода относятся аэрирование эжекторами, циклонами и поверхностными струями [10, 16].

Принцип захвата газа струями (каплями) жидкости реализован в конструкциях самотечных аэраторов (водосливные аэраторы, градирни, быстротокки, аэрационные решетки). При их работе используется энергия насоса или перепада воды в реках. Эффективность аэраторов в редких случаях достигает 1,2 кг O<sub>2</sub>/кВт·ч [4, 10]. Они применяются в основном для обезжелезивания, доочистки сточных вод и насыщения водоёмов кислородом воздуха.

Принцип захвата жидкостью газа, движущегося через суженные участки инжектирующих устройств, использован в аэраторах инжекторного типа, называемых иногда аэраторами Бернулли [10]. К ним относятся эжекторы, трубы Вентури, кольцевые сопла, шахтные водосливы, гидромеханические аэраторы и другие аналогичные им струйные аппараты [4, 10].

При работе этих диспергаторов происходит смешение и обмен энергии двух потоков разных давлений с образованием смешанного потока с промежуточным давлением. Подаваемая в аппарат при более высоком давлении среда называется рабочей. Поток, увлекаемый аппаратом за счёт вакуума при высоких скоростях движения жидкости в суженном сечении, называется инжектируемым. При этом в качестве рабочей среды используется жидкость, в качестве инжектируемой – газ [10].

При инжекторной диспергации подача газа может осуществляться при помощи газожидкостных струй, падающих на свободную поверхность жидкости – поверхностные диспергаторы («кольцевые сопла», шахтные водосливы, «погружные струи», разбрызгивающие розетки и форсунки), и за счёт подачи инжектируемого газа под уровень жидкости – погружные диспергаторы. Последние могут быть установлены вертикально и горизонтально. Ряд инжекторных устройств можно использовать как поверхностные и как погружные диспергаторы. Такие диспергаторы следует называть поверхностно-погружными. подача газожидкостной смеси в жидкость от этих диспергаторов может осуществляться как через открытые концы труб, так и при помощи различных распределителей [4, 10].

Особый интерес представляет применение струйных аппаратов для аэрации сточных вод в шахтных и башенных аэротенках. Так как при этом достигается высокий процент использования кислорода [4].

Применять инжекторные диспергаторы целесообразно в небольших очистных сооружениях. Разработка диспергаторов с меньшими удельными затратами электроэнергии на растворение кислорода позволяет использовать их и для сооружений большей производительности. Такие диспергаторы можно устанавливать для аэрации воды в водоемах и биологических прудах, а также для подземного обезжелезивания водопроводной воды и т. п. Использование инжекторных диспергаторов при очистке сточных вод в аэротенках позволяет отказаться от сложных устройств, а при аэрации воды в биопрудах и водоемах от плавающих аэраторов. Основным элементом инжекторных диспергаторов является насос, что значительно упрощает эксплуатацию сооружений [4].

Эжекторные устройства имеют более высокую энергетическую эффективность по сравнению с механическими диспергаторами и позволяют получать

более мелкие пузырьки газа, однако и с их помощью не удастся получить средний диаметр пузырьков менее 1 мм без использования ПАВ [4, 10]. Циклонные аэраторы позволяют получать тонкие водовоздушные эмульсии при больших давлениях и расходах жидкости и небольших расходах газа, но удельные затраты энергии на диспергирование газа при таких режимах высокие, а диапазон давлений и расходов устойчивой работы – узкий, поэтому данные устройства в практике водоснабжения и водоотведения не нашли широко применения. Диспергирование поверхностными струями почти в два раза эффективнее по затратам энергии по сравнению с механическим диспергированием [2, 4, 6, 14, 15], но больше пригодно для введения в жидкость атмосферного воздуха, а не каких-либо специальных газов-озона, кислорода и т. д. Средний диаметр пузырьков при струйном диспергировании под углом  $30\text{--}60^\circ$  к свободной поверхности и скорости струи 10...20 м/с составляет 1 мм, но при этом наблюдается большая полидисперсность образующихся пузырьков – от 0,2 до 3,5 мм [1, 2, 4, 6, 7].

При физико-химическом методе диспергации газирование жидкости происходит либо за счет выделения газа из пресыщенного раствора, либо при протекании химической или электрохимической реакции [17, 18].

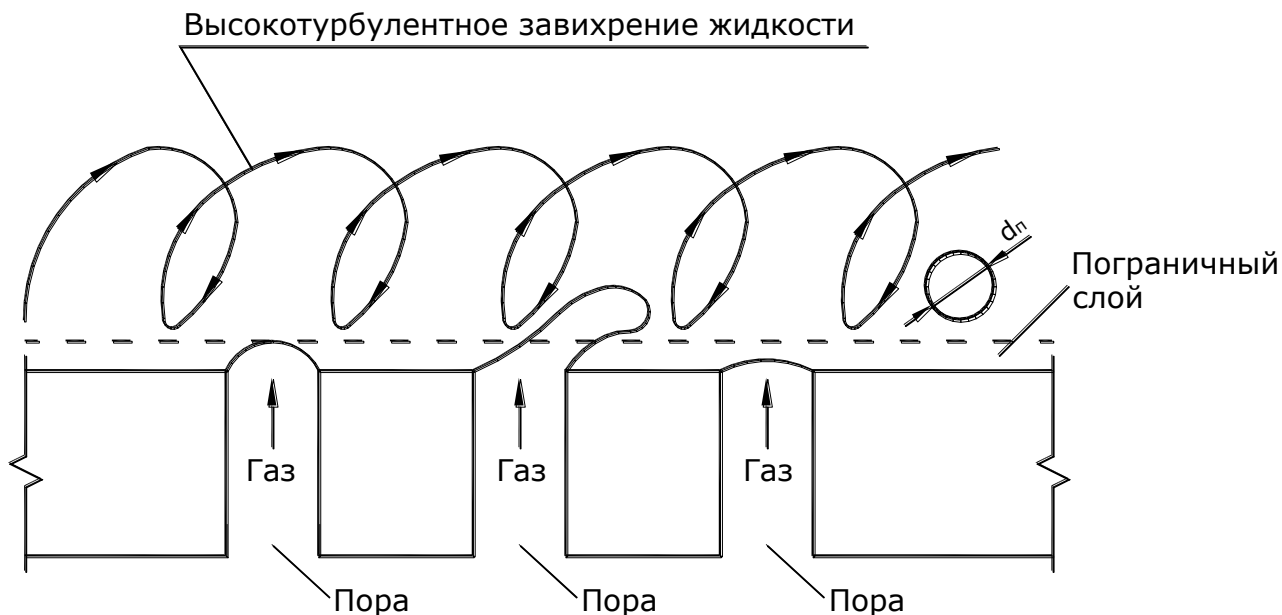
Газирование жидкости происходит за счет выделения газа из пересыщенного раствора при изменении его растворимости, основано на использовании повышенного давления или вакуума для создания пересыщенного раствора [7, 17]. Жидкость насыщают диспергируемым газом при атмосферном или повышенном (0,3...0,6 МПа) давлении, выделение газа происходит при вакуумировании жидкости (вакуумный метод) или при сбросе давления до атмосферного (напорный метод). При выделении газа из пересыщенного раствора образуются очень мелкие пузырьки (средний диаметр 0,1...0,5 мм), причем они формируются непосредственно на поверхности гидрофобных частиц, что обеспечивает высокую эффективность использования данного метода при флотации [7, 17]. Недостатками метода является сложное аппаратное оформление, повышенные затраты энергии, ограниченная степень газирования, которая зависит от растворимости газа при рабочем давлении. Например, растворимость воздуха в воде составляет около 30...50 л воздуха в 1 м<sup>3</sup> воды в интервале 0,3...0,5 МПа [7, 17].

Газирование жидкости за счет выделения газа при протекании химической или электрохимической реакции не позволяет диспергировать требуемый газ, поскольку состав газов при протекании химических реакций целиком определяется взаимодействующими реагентами, а при электрохимических – практически всегда на катоде выделяется водород, а на аноде – кислород. Другие газы при электрохимических реакциях в водных растворах в обычных условиях почти не образуются [7, 18, 19]. Однако для целей флотации электрохимический способ получения мелкой газовой дисперсии дает хороший эффект, поскольку позволяет получать наименьший средний диаметр газовых пузырьков – 0,04...0,2 мм, хотя и с высокими затратами энергии [7, 18, 19].

На кафедре водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета предложен пневмогидравлический метод диспергирования газа высокотурбулентным потоком жидкости в пористой трубе. Данный метод разрабатывается для получения мелких газовых дисперсий с диаметром пузырьков менее 1 мм, необходимых в

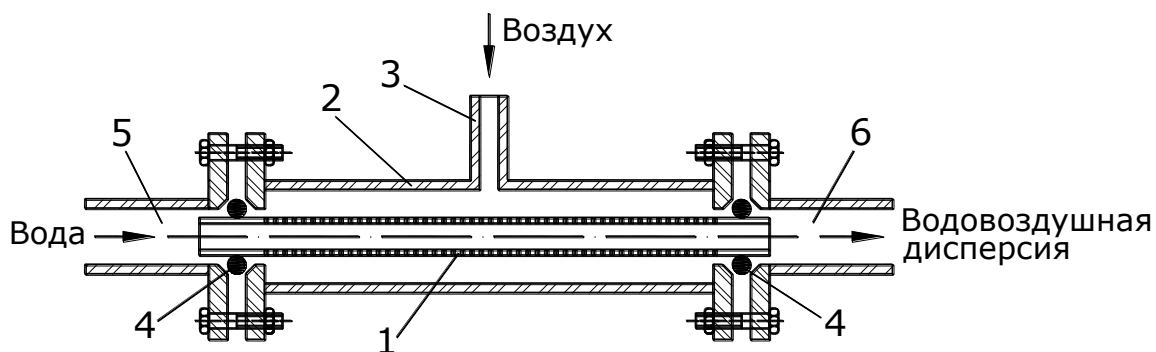
процессах флотации, озонирования, обескислороживания. В отличие от выше-рассмотренных методов получения мелких газовых дисперсий, разрабатываемый метод не требует использования громоздкого и сложного оборудования, позволяет диспергировать газы любого состава с высоким удельным расходом, имеет сравнительно невысокую энергозатратность [11, 12, 20].

Принцип данного метода диспергирования поясняется на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Схема образования пузырька газа при выходе из единичной поры в быстродвижущейся жидкости

На условия отрыва пузырька в потоке быстродвижущейся жидкости в основном влияет толщина пограничного слоя, определяемая числом Рейнольдса, диаметр пор, структура поверхности пористого материала и скорость движения газа на выходе из пор. Для оценки влияния данных факторов на процесс диспергирования газа можно использовать экспериментальное устройство, конструкция которого приведена на рисунке 2.



1 – пористая трубка; 2 – корпус с фланцами; 3 – патрубок подачи воздуха; 4 – уплотнитель; 5 – патрубок подачи воды; 6 – патрубок отвода водовоздушной дисперсии

**Рисунок 2** – Пневмогидравлический диспергатор газа «Торнадо»

Диспергатор «Торнадо» представляет собой мелкопористую трубку, расположенную в металлическом корпусе с фланцами. На концах пористой трубки между фланцами корпуса имеется уплотнение, поэтому контакт жидкости и газа осуществляется только через стенку пористой трубки. В пространство между наружной поверхностью пористой трубки и металлическим корпусом подается газ с помощью патрубка подачи газа [11, 12, 20].

### **Заключение**

Сравнение различных систем диспергирования газа показывает, что наименьшими энергетическими затратами на диспергирование обладает барботажный метод, однако он позволяет получать только сравнительно крупные газовые дисперсии. Механическое и гидродинамическое диспергирование газа позволяет получать более мелкие газовые дисперсии, но при более высоких удельных затратах энергии. Наиболее мелкие газовые дисперсии получаются при выделении газа в результате его выделения из раствора или при проведении электрохимической реакции на электродах. Однако недостатками данного метода являются невозможность получения больших удельных расходов газа (при выделении воздуха из водного раствора – 30...50 литров на один метр кубический воды, а при осуществлении электрохимической реакции на электродах газовыделение ограничено предельной плотностью тока), большими затратами энергии, ограничением химического состава получаемых газовых дисперсий. Поэтому является актуальной разработка метода диспергирования газа, сочетающего в себе такие преимущества, как невысокие затраты энергии и мелкий диаметр получаемых пузырьков, который позволит эффективно диспергировать газ в обрабатываемую жидкость.

По мнению авторов наиболее предпочтительным является пневмогидравлический метод, так как требует невысоких затрат энергии на диспергирование, имеет высокую надежность вследствие отсутствия движущихся частей и позволяет получить газовые пузырьки диаметром менее 1 мм, что обеспечит высокую эффективность растворения сравнительно дорогостоящих газов (кислород, озон и т. д.).

### **Список использованных источников**

1. Пенная сепарация и колонная флотация / Ю. Б. Рубинштейн, В. И. Мелик-Гайказян, Н. В. Матвеев, С. Б. Леонов. – М. : Недра, 1989. – 304 с.
2. Мещеряков, Н. Ф. Флотационные машины и аппараты / Н. Ф. Мещеряков. – М. : Недра, 1982. – 200 с.
3. Жерноклев, А. К. Аэрация и озонирование в процессах очистки воды / А. К. Жерноклев, Л. П. Пилинович, В. В. Савич. – Минск : Тонпик, 2002. – 129 с.
4. Попкович, Г. С. Системы аэрации сточных вод / Г. С. Попкович, Б. Н. Репин. – М. : Стройиздат, 1986. – 136 с.
5. Воронов, Ю. В. Струйная аэрация / Ю. В. Воронов, В. Д. Казаков, М. Ю. Толстой. – М. : изд-во Ассоц. строительных вузов, 2007. – 215 с.
6. Перепелкин, К. Е. Газовые эмульсии / К. Е. Перепелкин, В. С. Матвеев. – Л. : Химия, 1979. – 164 с.

7. Золотов, А. В. Способы получения газовой дисперсии в объеме жидкости / А. В. Золотов, И. С. Багреева // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2017. – № 1. – С. 18–22.

8. Григорьева, А. Н. Влияние конструкции перемешивающего устройства на эффективность массообмена при пневмомеханической аэрации сточных вод / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 6. – С. 25–32.

9. Григорьева, А. Н. Влияние геометрии перемешивающего устройства на диаметр пузырьков воздуха при перемешивании в системе газ-жидкость / А. Н. Григорьева, Р. Ш. Абиев // Химическая промышленность сегодня. – 2019. – № 5. – С. 18–22.

10. Лямаев, Б. Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б. Ф. Лямаев. – Л. : Машиностроение, 1988. – 256 с.

11. Белов, С. Г. Пневмогидравлический диспергатор газа «Торнадо» / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик, Е. И. Дмухайло // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 25–27 сент. 2013 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: А. А. Волчек [и др.]. – Брест, 2013. – С. 7–12.

12. Пневмогидравлический диспергатор газа : пат. ВУ 12838 / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик. – Оpubл. 28.02.2022.

13. Сивак, В. М. Аэраторы для очистки природных и сточных вод / В. М. Сивак, Н. Е. Янушевский. – Львов : Вища школа, 1984. – 124 с.

14. Ксенофонтов, Б. С. Использование процессов струйной аэрации в процессах флотационной очистки сточных вод / Б. С. Ксенофонтов // Сантехника. – 2022. – № 6. – С. 32–37.

15. Ксенофонтов, Б. С. Повышение эффективности струйной аэрации в процессах флотационной очистки сточных вод / Б. С. Ксенофонтов // Сантехника. – 2020. – № 4. – С. 36–39.

16. Ксенофонтов, Б. С. Интенсификация флотационной очистки сточных вод с использованием струйных аэраторов и эжекторов / Б. С. Ксенофонтов, Е. С. Стельмах // Водоочистка. – 2018. – № 6. – С. 25–35.

17. Анопольский, В. Н. Применение напорной флотации в технологии очистки природных и сточных вод / В. Н. Анопольский, Г. Н. Фелдштейн, Е. Г. Фельдштейн // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2008. – № 8 (8). – С. 38–44.

18. Гафаров, Г. А. Электрофлотационная очистка сточных вод от нефтепродуктов / Г. А. Гафаров // Водоснабжение и канализация. – 2011. – № 5. – С. 80–83.

19. Кинетика электрофлотационной очистки судовых сточных вод от нефтепродуктов / И. А. Минаева, В. А. Колесников, Ю. И. Капустин, Е. В. Матвеева // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 10. – С. 32–38.

20. Наумчик, Г. О. Разработка метода диспергирования газа с помощью турбулентного потока жидкости на границе пористой стенки / Г. О. Наумчик, В. С. Белов // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2017. – № 2. – С. 102–105.

## РОЛЬ ПРЕДПРОЕКТНОЙ СТАДИИ В СОЗДАНИИ УСТОЙЧИВОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

*А. А. Волчек<sup>1</sup>, Л. В. Образцов<sup>2</sup>, Л. Г. Срывкина<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Д. г. н., профессор, профессор кафедры природообустройства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: volchak@tut.by

<sup>2</sup> К. т. н., доцент, доцент кафедры экономики и организации строительства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь

<sup>3</sup> Старший преподаватель кафедры экономики и организации строительства УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: lgsryvkina@mail.ru

### Реферат

Предпроектная стадия формирует потенциал объекта в отношении его возможности в дальнейшем формировать устойчивую среду для жизнедеятельности. Качество принимаемых на данном этапе решений и их долгосрочные последствия напрямую зависят от технической, экономической и экологической грамотности заказчика (собственника) объекта. Важными элементами сознательного и грамотного подхода являются вариантная проработка архитектурных, конструктивных, инженерно-технологических решений объекта в комплексе с анализом социальных и экологических последствий его строительства и эксплуатации, а также прогнозирование развития рынка недвижимости и потребностей общества.

**Ключевые слова:** жизненный цикл объекта, предпроектная стадия, заказчик, устойчивая среда для жизнедеятельности, экономическая оценка эффективности инвестиций, затраты, удовлетворенность потребителей.

## THE POLE OF THE PRE-DESIGN STAGE IN CREATING A SUSTAINABLE LIVING ENVIRONMENT

*A. A. Volchak, L. V. Obrazcov, L. G. Sryvkina*

### Abstract

The pre-design stage forms the potential of the object in relation to its ability to further create a sustainable living environment. The quality of decisions made at this stage and their long-term consequences directly depend on the technical, economic, and environmental literacy of the customer (owner) of the object. Important elements of a conscious and competent approach are a variant study of the architectural, constructive, engineering and technological solutions of the object un combination with an analysis of the social and environmental consequences of its construction and operation, as well as forecasting the development of the real estate market and the needs of society.

**Keywords:** object life cycle, pre-design stage, customer, sustainable living environment, economic assessment of investment efficiency, costs, consumer satisfaction.

## **Введение**

Жизненный цикл объектов строительства представляет собой последовательность предынвестиционной (предпроектной), инвестиционной, эксплуатационной и ликвидационной стадий. Каждая из них вносит свой вклад в формирование устойчивой среды для деятельности, но определяющая роль принадлежит предпроектной стадии и раннему этапу проектирования, когда формируется концепция объекта, принимаются принципиальные решения по выбору архитектурно-конструктивных и технологических решений, основных материалов и оборудования, то есть формируется тот потенциал объекта, который предопределяет возможность достижения целей устойчивого развития.

## **1 Потенциал предпроектной стадии**

На предпроектной стадии в составе обоснования инвестиций формируется концепция объекта строительства, определяется возможность и целесообразность вложения средств в его возведение, реконструкцию или реставрацию, выполняется оценка его воздействия на окружающую среду, производятся расчеты, связанные с оценкой эффективности инвестиций, определением социальных и экологических последствий строительства и эксплуатации [1].

На данной стадии закладывается экономический, экологический и социальный потенциал объекта на весь его жизненный цикл, поэтому чрезвычайно важными являются сознательный и грамотный подход как со стороны инвестора (заказчика, собственника), так и со стороны разработчика предпроектной документации, включающий:

- ✓ комплексный анализ социальных, экономических и экологических последствий строительства и эксплуатации объекта [2];
- ✓ вариантную проработку всех решений объекта – архитектурно-конструктивных, инженерного и технологического оборудования;
- ✓ экономическую оценку эффективности инвестиций с учетом полных затрат жизненного цикла объекта, то есть единовременных затрат (на предынвестиционной, инвестиционной и ликвидационной стадии) и периодических затрат (на эксплуатационной стадии) [3].

Формируемый на предпроектной стадии потенциал устойчивости объекта включает следующие составляющие [4]: энергоэффективность, использование возобновляемых природных ресурсов, варианты коммерческого использования объекта, способность к редевелопменту, продлению срока службы (эксплуатации); возможность рециклинга отходов в процессе строительства и эксплуатации.

Риски предпроектной стадии в части создания устойчивой среды для деятельности связаны с воздействием следующих факторов:

- ✓ недостаточной экономической и экологической грамотностью заказчиков (собственников), которые при принятии решений опираются в первую очередь на снижение единовременных затрат предынвестиционной и инвестиционной стадий, часто игнорируя эксплуатационные расходы, в том числе связан-

ные с частой заменой оборудования, текущими ремонтами и необходимостью модернизации объекта в процессе срока его службы для удовлетворения потребностей пользователей;

- ✓ неспособностью заказчика (собственника) прогнозировать тенденции развития рынка недвижимости, потребности потенциальных пользователей объекта;

- ✓ недостаточной квалификацией разработчиков предпроектной документации;

- ✓ несовершенством нормативно-законодательной базы.

## **2 Роль заказчика (собственника) объекта**

Ведущая роль на предпроектной стадии принадлежит заказчику (собственнику). Именно он принимает принципиальные решения, в том числе в отношении необходимости вариантной проработки решений объекта. Поэтому важно, чтобы у него сформировалось грамотное представление об «устойчивом девелопменте», рассчитанном на длительный период времени и достижение оптимального результата от функционирования объекта как с точки зрения экономических выгод собственника, так и с точки зрения состояния окружающей среды, то есть на создание устойчивой среды для деятельности.

Формирование устойчивой среды для деятельности подразумевает комплексное решение задач, связанных с проектированием параметров объекта и изучением поведения потребителей (жильцов, арендаторов, пользователей объекта, покупателей продукции объекта) [4]:

- ✓ сокращение затрат на воду, энергию, сырье при росте вложений в знания и навыки; оптимизация срока службы объекта;

- ✓ создание помещений с лучшими потребительскими свойствами (лучшей среды для проживания, лучшей среды для деятельности);

- ✓ сокращение выбросов загрязняющих веществ, сбросов сточных вод, отходов в процессе строительства и эксплуатации объекта;

- ✓ создание продукции с лучшими экологическими параметрами (для объектов производственного назначения и инженерной инфраструктуры);

- ✓ рост удовлетворенности потребителей продукции, работ, услуг; рост доходов собственника объекта.

## **Заключение**

На предпроектной стадии закладывается потенциал объекта в части создания устойчивой среды для деятельности. Ведущая роль в этом процессе принадлежит заказчику (собственнику), который должен быть достаточно экономически и экологически грамотным, чтобы предусмотреть вариантную проработку всех решений объекта, учесть потребности пользователей (в том числе будущих), потребителей продукции и услуг объекта.

## **Список использованных источников**

1. Состав и порядок разработки предпроектной (предынвестиционной) документации : СП 1.02.01-2023. – Введ. 25.07.2023. – Минск : Минстройархитектуры, 2023. – 75 с.

2. Волчек, А. А. Организационно-экономические и экологические аспекты модернизации водохозяйственных объектов жилищно-коммунального хозяйства в западном трансграничном регионе Беларуси : [монография] / А. А. Волчек, Л. В. Образцов, П. В. Шведовский. – Минск : РИВШ, 2020. – 175 с.

3. Кочурко, А. Н. Анализ подходов к оценке эффективности альтернатив реализации инвестиционных проектов на предпроектной стадии / А. Н. Кочурко, Л. Г. Срывкина // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – № 1. – С. 100–106.

4. Кисель, Е. И. Формирование экономического потенциала объекта недвижимости при решении задач экологического менеджмента в процессе строительной деятельности / Е. И. Кисель, Л. Г. Срывкина // Новая экономика. – 2021. – Спецвыпуск № 3 (2021). – С. 54–60.

УДК 624.012.3:519.816

## **АНАЛИЗ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

*Ю. С. Дордюк<sup>1</sup>, Н. П. Яловая<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>К. т. н., доцент, заведующий кафедрой экономики и организации строительства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: jul4onka@mail.ru*

*<sup>2</sup>К. т. н., доцент, проректор по идеологической и воспитательной работе, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: yalnat@yandex.by*

### **Реферат**

В статье проведен анализ современных методов оценки технического состояния конструктивных систем и их элементов на основании анализа дефектов, устанавливаемых при визуальном обследовании, описаны диагностические параметры (базисные переменные), учитываемые при формировании базы знаний системы показателей (рейтингов).

**Ключевые слова:** предварительное обследование, осмотр, дефект, повреждение, строительная конструкция, диагностика.

## **ANALYSIS OF DIAGNOSTIC PARAMETERS DURING INSPECTION OF THE TECHNICAL CONDITION OF BUILDING STRUCTURES**

**Yu. S. Dardziuk, N. P. Yalavaya**

### **Abstract**

The article analyzes modern methods for assessing the technical condition of structural systems and their elements, based on the analysis of defects identified during visual inspection, and describes diagnostic parameters (basic variables) taken into account when forming the knowledge base of the system of indicators (ratings).

**Keywords:** preliminary examination, inspection, defect, damage, building structure, diagnostics.

## 1 Введение

Процесс оценивания технического состояния существующих конструкций в общем случае принято подразделять на три характерных этапа: предварительное или общее обследование; детальное обследование; обработка данных, полученных в ходе обследования, и формулирование заключения.

Оценка, выполняемая на этапе предварительного (общего) обследования, чаще всего является субъективной, зависит от опыта и квалификации эксперта и часто приводит либо к неэкономичным, либо небезопасным последствиям. Несмотря на то, что на протяжении ряда лет оценка технического состояния конструкций является основной из проблем, с которыми сталкиваются практикующие инженеры, данная процедура, в частности, при проведении предварительного (общего) обследования не является совершенной и требует дальнейшей доработки.

## 2 Методы и материалы

В Республике Беларусь с 1 января 2021 года обследование технического состояния строительных конструкций выполняют по впервые введенным строительным нормам СН 1.04.01 [1]. В соответствии с данным документом обследование состоит из трех основных этапов:

- 1 этап – предварительный осмотр здания;
- 2 этап – общее обследование (по внешним признакам);
- 3 этап – детальное (инструментальное) обследование.

Предварительный осмотр здания производят до составления технического задания на проведение обследования для уточнения цели и задач работы, предварительного определения объемов и сроков производства работ, объема имеющейся проектной, исполнительной и эксплуатационной документации, условий доступа к обследуемым элементам здания.

Общее обследование проводится для общей оценки технического состояния строительных конструкций, определения необходимости, объема и программы детального обследования. Общее обследование включает в себя общую оценку конструктивной схемы и соответствия здания проектной документации в части объемно-планировочного и конструктивного решения, а также по виду и характеру нагрузок, условиям эксплуатации. По внешним признакам дается ориентировочная оценка категории состояния отдельных конструкций с определением необходимости проведения противоаварийных мероприятий.

При общем обследовании проводят визуальный осмотр всех конструкций с применением в необходимых случаях инструментов и приборов. При необходимости выполняют испытания и измерения для получения дополнительных данных о состоянии конструкций и их соответствии проектной документации: ориентировочная оценка прочности бетона и его плотности, измерение ширины раскрытия и глубины наиболее характерных трещин, выборочное измерение наибольших отклонений основных размеров от проектной документации.

В Российской Федерации на сегодняшний день основным нормативным документом в строительной отрасли, в соответствии с которым должно прово-

даться обследование зданий и сооружений, является ГОСТ 31937 [2]. В соответствии с документом [2] обследование технического состояния зданий (сооружений) должно проводиться в три этапа:

- 1 этап – подготовка к проведению обследования;
- 2 этап – предварительное (визуальное) обследование;
- 3 этап – детальное (инструментальное) обследование.

Подготовительные работы проводят в целях: ознакомления с объектом обследования, его объемно-планировочным и конструктивным решением, материалами инженерно-геологических изысканий; сбора и анализа проектно-технической документации; составления программы работ с учетом согласованного с заказчиком технического задания.

Предварительное (визуальное) обследование проводят в целях предварительной оценки технического состояния строительных конструкций и инженерного оборудования, электрических сетей и средств связи по внешним признакам, определения необходимости в проведении детального (инструментального) обследования и уточнения программы работ.

В руководстве [3] состояние конструкции оценивается на двух уровнях:

- I. Предварительное (визуальное) обследование.
- II. Детальное обследование.

Если на уровне предварительного (визуального) обследования получена достаточно полная информация о состоянии объекта, то переходить к детальному обследованию не рекомендуется.

Предварительное (визуальное) обследование состоит из следующих трех этапов:

1) Сбор информации и ее детализация о проектировании здания, строительстве, эксплуатации и техническом обслуживании за последнее время.

2) Визуальное инспектирование технического состояния и фиксация повреждений.

3) Оценка конструкционной безопасности в соответствии с действующими строительными нормами и правилами или по определенным рабочим документам.

Для предварительного (визуального) обследования необходимы комплекты документов по проектированию конструкций и чертежи, включая спецификацию используемых материалов, инженерно-геодезические изыскания, документы по ремонту или модернизации, проведенные после строительства объекта, документы по эксплуатации здания, включая нагрузки. Также на данном этапе могут быть проведены полевые испытания по определению прочности бетона с применением неразрушающих методов контроля. При этом если приведенная выше документация отсутствует, необходимо провести детальное обследование.

Основной целью предварительного (визуального) обследования согласно [3] является обследование и фиксация всех повреждений или конструктивных несоответствий и их расположения, используя эскизы и чертежи. Визуальное инспектирование включает в себя:

- проверку достоверности исходных чертежей или определение базовой информации об объекте, если чертежи отсутствуют;
- определение основных отклонений, не представленных на оригинальных строительных документах;

- определение видимых конструктивных повреждений, таких как трещины и отслоения, а также проверка качества конструкций;
- определение потенциального риска падения несущих элементов: потолка, перегородок, стен, парапетов, крепежей и др.;
- обследование состояния грунтов и фундамента;
- формирование отчета по текущему состоянию с фотографиями.

Также по требованиям [3] должны быть отображены любые наблюдаемые отклонения от проектных. На основе собранных данных инженер-обследователь (эксперт) классифицирует повреждения по типу и значимости и дает оценку дальнейшей эксплуатации.

В руководстве [4] обследование здания/конструкций осуществляется в четыре этапа, которые показаны на рисунке 1:

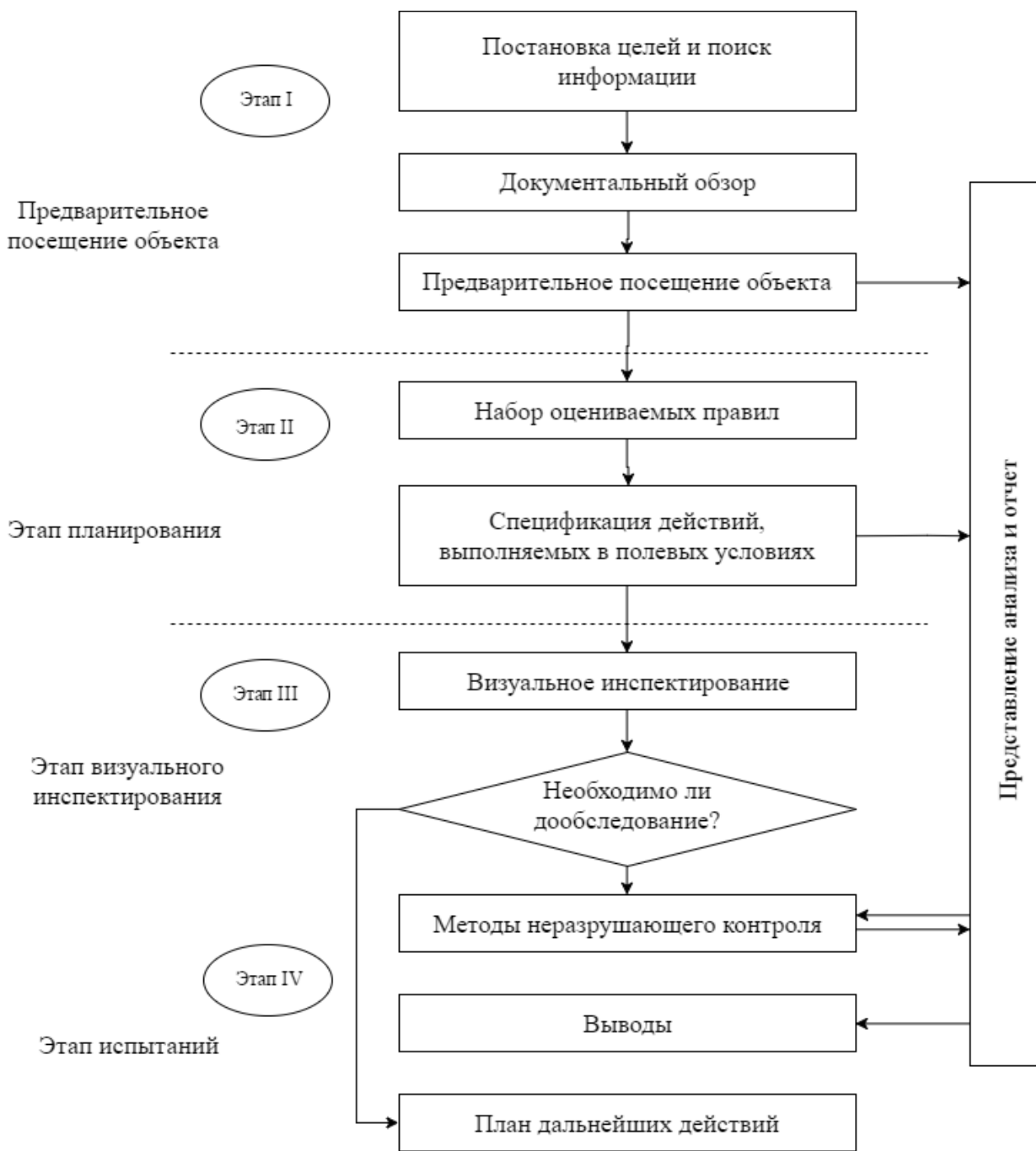
- 1) Предварительное инспектирование.
- 2) Планирование работ.
- 3) Визуальное инспектирование.
- 4) Натурные и лабораторные испытания.

Основная цель предварительного инспектирования – оценка и сбор информации для этапа планирования до проведения самого обследования.

Этап планирования включает в себя подготовку документов, группировку конструктивных элементов по их конструктивным решениям, значимости и т. д. и диагностику дефектов. Диагностика дефектов и повреждений представлена в таблице 2.

**Таблица 1** – Диагностика дефектов и повреждений согласно [4]

Причина	Признак			Возрастные изменения	
	трещины	отслоения	разрушение	ранние	долгосрочные
Конструктивные повреждения	+	+	–	+	+
Коррозия арматуры	+	+	–	–	+
Химическое воздействие	+	+	+	–	+
Разрушения от мороза	+	+	+	+	–
Повреждения огнем	+	+	–	+	–
Внутренние реакции	+	+	–	–	+
Тепловые воздействия	+	+	–	+	+
Усадка	+	–	–	+	+
Ползучесть	+	+	–	–	+
Быстрая сушка	+	–	–	+	–
Пластическая усадка	+	–	–	+	–
Внешние повреждения	+	+	+	+	+



**Рисунок 1** – Схема алгоритма, иллюстрирующая процесс обследования [4]

Визуальный осмотр (инспектирование) конструкции является наиболее эффективным качественным методом оценивания технического состояния и выявления типичных повреждений. Он предназначен для быстрого обследования конструкции и оценки ее общего состояния. Он дает ценную информацию опытному инженеру в отношении качества изготовления конструкции, эксплуатационной пригодности и механизма дальнейшего разрушения, а следовательно, является основой для детализации плана дальнейших действий и количественной оценки степени повреждения. Вместе с тем, степень объективности оценивания в значительной мере зависит от квалификации эксперта.

### 3 Результаты и обсуждения

Таким образом, как видно из представленных этапов обследования строительных конструкций в различных документах, наибольшая степень неопределенностей в оценивании технического состояния содержится на этапе предварительного обследования, хотя данный этап является наиболее важным с точки зрения принятия решений как о дальнейшем проведении детального обследования, так и о планируемых мероприятиях по обеспечению безопасности и эксплуатационной пригодности конструктивной системы.

Наиболее важным элементом предварительного обследования является разработка системы показателей (рейтингов), позволяющей классифицировать категорию состояния существующей конструкции. Как показано в [5], важнейшей частью любой системы является база знаний, состоящая из правил анализа информации по конкретной проблеме, как модели поведения экспертов в определенной области знания, с использованием процедур логического вывода и принятия решений. Иными словами, база знаний – это совокупность фактов и правил логического вывода в выбранной предметной области деятельности.

Согласно [6], база знаний содержит факты (статические сведения о предметной области) и правила – набор инструкций, применяя которые к известным фактам можно получить новые факты. Следует отметить, что все существующие системы ориентированы на решение определенного круга задач в узкой предметной области и не могут быть использованы для решения даже близких, но не предусмотренных при их создании проблем [6].

### 4 Заключение

Таким образом, на основании представленного выше анализа дефектов и повреждений железобетонных конструкций, а также требований, предъявляемых на этапе предварительного обследования, в том числе по зафиксированным в процессе визуального (общего) предварительного обследования внешним признакам, для оценивания технического состояния строительных конструкций при формировании базы знаний системы показателей (рейтингов) следует учитывать следующие диагностические параметры (см. таблицу 2) [7].

**Таблица 2** – Параметры, учитываемые при формировании базы знаний системы показателей (рейтингов)

Параметры, устанавливаемые при визуальном обследовании	Параметры, учитываемые при формировании базы знаний
Трещины:	
продольные коррозионные вдоль арматурного стержня	+
нормальные	+
наклонные	+
силового характера в сжатой зоне	+
Повреждения защитного слоя бетона (сколы, отслоение, каверны, раковины, пустоты, инородные включения в бетоне)	+
Промасливание бетона	+

## Продолжение таблицы 2

Параметры, устанавливаемые при визуальном обследовании	Параметры, учитываемые при формировании базы знаний
Глубина карбонизации бетона	–
Оголения арматуры	+
Коррозионные повреждения арматуры	+
Разрывы или выпучивание арматуры	–
Несоответствие размеров или формы конструкции проектным	–
Несоответствие размеров площадок опирания элементов	–
Прогибы (относительные прогибы)	+
Прочность бетона	–
Комплекты документов по проектированию конструкций и чертежи, включая спецификацию используемых материалов, инженерно-геодезические изыскания, документы по ремонту или модернизации, проведенные после строительства объекта, документы по эксплуатации здания, включая нагрузки	+

*Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант № T23M-016).*

### Список использованных источников

1. Техническое состояние зданий и сооружений = Тэхнічны стан будынкаў і збудаванняў : СН 1.04.01-2020. – Взамен ТКП 45-1.04-305-2016. – Введ. 27.10.20. – Минск : Минстройархитектуры, 2021. – 66 с.
2. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния = Buildings and constructions. Rules of inspection and monitoring of the technical condition: ГОСТ 31937–2011. – Введ. 01.01.14. – М. : Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 2014. – 74 с.
3. Condition assessment of buildings for repair and upgrading : Report / National Disaster Management Programme ; prepared by prof. Anand S. Arya. – New Delhi, 2007. – 16 p.
4. Handbook on repair and rehabilitation of RCC structures / Central Public Works Department (CPWD). – New Delhi, 2002. – 498 p.
5. Джарратано, Дж. Экспертные системы: принципы разработки и программирования : пер. с англ. / Дж. Джарратано, Г. Райли. – Изд. 4-е. – М. : Вильямс, 2007. – 1152 с.
6. Джексон, П. Введение в экспертные системы : пер. с англ. / П. Джексон. – Изд. 3-е. – М. : Вильямс, 2001. – 622 с.
7. Тур, В. В. Диагностическая карта входных параметров при оценке технического состояния конструкций, основанной на применении инструментов нечеткой логики / В. В. Тур, Ю. С. Дордюк // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сборник науч. статей XXII Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 29–30 сентября 2022 г. / редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2022. – С. 233–241.

## МЕТОДЫ АНАЛИЗА ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗВИТИЯ ОБЩЕСТВЕННОЙ ФУНКЦИИ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЕ КРУПНОГО ГОРОДА

*А. В. Евстратенко*

*К. арх., доцент кафедры градостроительства, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: angelikaevstratenko@gmail.com*

### **Реферат**

Инструменты градостроительной оценки являются ключевыми при анализе и оптимизации структурно-функциональных характеристик центральной зоны города. Рациональное построение системы объектов общественного обслуживания имеет большое значение, поскольку не только способствует улучшению качества жизни горожан, но и поддерживает экономическую и культурную активность города. В данной статье рассматриваются аналитические подходы и методы, апробированные автором на примере г. Гомеля, и возможные для применения при определении динамики и особенностей развития общественной функции в центральной зоне и ядре города.

**Ключевые слова:** градостроительная эффективность, центральная зона города, функциональное зонирование, объекты общественного обслуживания, общегородской центр.

### **Введение**

Эффективность градостроительного использования территорий центральной зоны города – это комплексная характеристика, отражающая степень рационального освоения городских территорий с учетом социально-экономических целей и потенциала развития. В данном случае следует учитывать целый ряд составляющих эффективности: социальную, экономическую и инвестиционную, архитектурно-планировочную, инфраструктурную, санитарно-экологическую. Все указанные категории в той или иной степени связаны с характеристиками функциональной организации городского пространства. Общегородской центр содержит наибольший объем общественной застройки и отражает особенности развития города, его выдающиеся черты. Уникальность данной территории состоит в установлении поведенческих и деятельностных моделей за счет пространственной концентрации функций и возможности аккумулировать и воспроизводить новые черты городского образа жизни и экономики.

### **Основная часть**

Среди многих актуальных направлений градостроительного развития в приложении к центральной зоне необходимо особенно отметить следующие:

- наравне с количественным ростом улучшение качественных характеристик материально-пространственной среды, включая ее функционально-планировочную, экологическую, эстетическую составляющие;
- поддержание инвестиционной активности на высоком уровне;

- сохранение и наращивание культурно-духовного потенциала общегородского центра и города в целом;
- обеспечение обоснованности градостроительных решений на макро- и микроуровнях;
- формирование устойчивой среды жизнедеятельности населения.

Эффективность землепользования и качество среды проживания населения не подлежат оценке с помощью аналитических инструментов кадастровой системы. Статистические данные дают представление о характеристиках территории на уровне административного района и города. В то же время нередко требуется анализ развития общественной функции на уровне нескольких кварталов, отдельных линейных и узловых образований.

В теории и практике градостроительства принято руководствоваться рекомендуемыми значениями плотности общественных функций в общегородском центре, исчисляемой в тыс. кв. м рабочей площади на 1 га в зависимости от типа городского поселения. При этом взаимообусловленность функций и обоснованность размещения различных объектов общественного обслуживания практически не учитываются.

Эффективность формирования общественной функции в центральной зоне крупного города – довольно сложная категория, которая, по мнению автора, может быть выражена как абсолютными, так и относительными показателями. Имеет значение не только доля общественной застройки в общем объеме, но и ее структура, социальная значимость, характер распределения и связности объектов, формы их концентрации.

Методика, апробированная на примере г. Гомеля – одного из крупнейших городов Беларуси с населением более 500 тыс. чел., – заключается в использовании комплекса расчетных методов, дополненных экспертными оценками. Используя ее, удалось оценить и соотнести полученные показатели с особенностями исторического развития города [1–3]. С изменением социально-экономической ситуации с начала 1990-х гг. и переходом с административно-директивных на рыночные механизмы функционирования трансформировались условия формирования и структура системы обслуживания, социальный заказ и характер среды жизнедеятельности.

Для соответствующего анализа использовались следующие методы:

- определение границ центральной зоны и ядра центра города путем построения плановграмм и изохрон доступности, ограничиваемых временем и расстоянием;
- выявление зон максимальных концентраций объектов общественного обслуживания с учетом их типологии и совокупно;
- расчет соотношений общественных объектов различной функциональной принадлежности;
- расчет количества объектов общественного обслуживания на каждые 100 м в границах линейных пространств;
- определение иерархии улиц и их отдельных участков по показателю заполненности объектами общественного обслуживания;
- построение изохронограмм пешеходной и транспортной доступности для отдельных объектов.

Рассмотрим некоторые возможности применения перечисленных методов. На первом этапе определяются границы центральной зоны и ядра центра города

путем построения планограмм и изохрон доступности. В результате такого расчетного метода могут быть получены иные очертания, нежели те, которые приводятся в генеральном плане развития города. Корректирование результатов проводится экспертным путем в зависимости от реальной градостроительной ситуации. К примеру, это требуется в случаях, когда крупная ландшафтно-рекреационная зона не входит в расчетные границы по количественному функциональному признаку, однако по своей роли является частью ядра центра или центральной зоны города. Методы позволили определить действительные границы центральной зоны и ядра центра г. Гомеля.

Выявление зон максимальных концентраций объектов общественного обслуживания с учетом их типологии и совокупно позволяет построить градостроительный каркас, определить наиболее интенсивно развивающиеся городские пространства и общественные центры, прогнозировать дальнейшее их развитие. Несмотря на то, что в общегородском центре практически невозможно выделить специализированные функциональные зоны, целесообразно выделять области концентраций объектов общественного обслуживания на основании их социальной роли. Благодаря данному методу были определены размещение и тенденции развития главных и второстепенных ядер концентрации объектов торговли, питания, бытового обслуживания и объектов культуры, органов власти в центральной зоне г. Гомеля.

Расчет соотношений общественных объектов различных типологических групп – метод, позволяющий проследить трансформацию функционального освоения ключевых городских зон в историческом и социально-экономическом аспектах. Таким образом, удалось выявить закономерности развития общественной функции в центральной зоне г. Гомеля во взаимосвязи с потребностями населения в условиях различных политических и социально-экономических государственных моделей. С изменением последних структуру общественных центров стали формировать новые социальные ориентиры и инвестиционная практика. Современный этап отличается рыночными механизмами развития, созданием крупных торговых зон и новыми формами общественного обслуживания. За последние три десятилетия в центральной зоне г. Гомеля наибольшее приращение отмечено среди предприятий общественного питания и торговли непродовольственными товарами, а также бытового обслуживания.

Расчет количества объектов общественного обслуживания на каждые 100 м в границах отдельных линейных пространств позволяет определить уровень насыщения таковыми городских улиц, выявить характер и степень связности объектов различного назначения. Случаи, когда их емкость и значимость не учитываются (крупные административные, финансовые, медицинские, научные, учебно-воспитательные объекты), являются упрощением и приводят к погрешности в измерениях, устранимой экспертным путем. Благодаря данному анализу удалось заметить взаимообусловленность появления различных видов общественных объектов.

Иерархия улиц и их отдельных участков по показателю заполненности объектами общественного обслуживания демонстрирует наиболее ценные с точки зрения общественной значимости участки, их инвестиционную привлекательность и функциональную специфику. С помощью данного метода можно также установить емкостную и функциональную взаимосвязь развития узлов и линий

каркаса, проследить соответствующие изменения во времени. Для условий г. Гомеля установлено, что к настоящему времени количество объектов на каждые 100 м на главной улице Советской стало меньше, чем на улицах, ведущих к набравшим мощность узлам, сформированным на базе крупных торговых объектов. На данных территориях по мере освоения линий – преимущественно первых этажей жилых домов – начался процесс заполнения кварталов.

Согласно известной концепции о 15-минутном городе, сформулированной Карлосом Морено, необходимо создавать самодостаточные городские районы, где жители могут получить доступ к основным услугам, местам работы, образования, досуга и здравоохранения в шаговой доступности. Как в советских, так и в действующих нормативных документах регламентируется доступность для населения объектов повседневного, периодического и эпизодического спроса. В свете данных требований важнейшую роль играют значения радиусов оптимальной доступности отдельных объектов и их концентраций, определяемые по изохронограммам транспортной и пешеходной доступности. С помощью открытых геоинформационных сервисов можно также получить сведения об инфраструктуре и численность населения в выделенном районе. Соответствующий анализ ситуации, сложившейся в г. Гомеле, продемонстрировал тенденцию неэффективного разрастания границ центра и города в целом.

Использование геоинформационных систем позволяет проводить пространственный анализ и визуализировать данные. Весьма интересным с точки зрения градостроительных исследований является направление геоинформационного маркетинга. Инструменты геоаналитики, используемые при поиске привлекательных локаций для размещения объектов ритейла, позволяют провести анализ территории с учетом плотности автомобильного и пешеходного трафика (к примеру, по тепловым картам), конкуретного окружения, инфраструктуры (объектов притяжения, удобных подъездных путей, остановок общественного транспорта и др.), поведения, демографического состава и доходов населения. Однако существенным ограничением при использовании инструментов геомаркетинга является недостаточность открытых данных.

Понимание функциональных закономерностей развития системы общественного обслуживания позволяет проследить тенденции «пространственного развития общества», взаимообусловленность объектов различного назначения и эффективность градостроительного освоения территории.

## **Выводы**

Методология градостроительной оценки эффективности развития общественной функции в центральной зоне города играет ключевую роль в создании гармоничного, экономически и экологически устойчивого городского пространства. Применение качественных и количественных методов, а также современных технологий в совокупности с экспертными оценками позволяет получить точные и адаптированные к потребностям населения расчетные характеристики. Несмотря на информативность приведенных методов, при проведении градостроительной оценки развития общественной функции исследователи сталкиваются с проблемой нехватки данных и определенной трудоемкости получения результатов.

### Список использованных источников

1. Ковырев, С. И. Развитие функционального каркаса центральной части г. Гомеля / С. И. Ковырев, А. В. Евстратенко // Архитектура : сборник научных трудов / редкол.: А. С. Сардаров (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2024. – Вып. 16. – С. 126–132.

2. Евстратенко, А. В. Депрессивные территории в структуре г. Гомеля / А. В. Евстратенко // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2024. – № 134/2. – С. 12–18.

3. Евстратенко, А. В. Развитие функционально-пространственной структуры и каркаса центральной зоны Гомеля / А. В. Евстратенко, С. И. Ковырев // Архитектура и строительство. – 2024. – № 4. – С. 6–11.

УДК 69.04

## ИНТЕГРАЦИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СТРОИТЕЛЬНУЮ ИНДУСТРИЮ

*М. М. Каширипур<sup>1</sup>, В. А. Николюк<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Канд. архитектуры, постдоктор, доцент, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: mkashiripour@gmail.com*

<sup>2</sup> *Магистрант строительного факультета, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: vladimir.nik2001@yandex.by*

### Реферат

В данной статье рассматриваются методы интеграции искусственного интеллекта в различные виды направленностей строительной сферы. Описываются преимущества и недостатки рассматриваемых интеграций, анализируется их новизна. Изучается мнение экспертов и частных энтузиастов в сфере современных технологий, робототехники и строительства. Приводятся преимущества и недостатки использования искусственного интеллекта в рассматриваемых направленностях строительной индустрии с изложением вывода о проделанной работе.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, строительная индустрия, инновационные технологии, интеграция, строительство.

### Введение

Трудоёмкость и сложность выполнения работ являются одними из основных факторов, заставляющих человечество прибегнуть к созданию универсальной технологии, способствующей упрощению выполнения поставленных задач. Благодаря ежедневному прогрессу в развитии научной сферы, компьютерной инженерии и инновационных технологий, человечество оказывается на пороге создания универсального продукта, способного уже на первоначальных этапах предоставить решение возложенных на него задач [1]. Одним из таких продуктов является технология искусственного интеллекта.

Помимо решения рядовых и упрощённых задач, данная технология под гнётом развития инженерии уже готова скакнуть на новый этап собственной эволюции, предоставляя возможность выполнения ещё более сложных задач, при этом имея потенциал на собственное автономное развитие без какого-либо стороннего вмешательства, тем самым упрощая ход выполнения работ и экономя человеческие ресурсы с последующим предоставлением более продвинутых и экономически выгодных результатов труда.

Как и любой инновационный продукт, технология искусственного интеллекта имеет собственные преимущества и недостатки, подробный разбор и изучение которых поспособствует положительной корректировке рассматриваемой технологии. Для достижения решения данного вопроса следует выделить основные задачи, такие как:

- досканальное изучение имеющихся на данный момент результатов применения технологии искусственного интеллекта в строительной сфере;
- мнение экспертов и частных энтузиастов в сферах компьютерных технологий, строительства и инженерии;
- актуальность применения рассматриваемой технологии;
- отклик на применение искусственного интеллекта со стороны населения;
- анализ эффективности выполнения поставленных задач.

### **Результаты и обсуждения**

Имея большое количество технологий, способных упрощать человеческую жизнь как повседневную, так и трудовую, научное сообщество продолжило развивать имеющиеся труды для достижения более совершенного результата от применения данных инноваций. В основу развития легла потребность населения во взаимозаменяемости человеческих ресурсов, эффективность и дешевизна которых не будет уступать ныне имеющимся. Также учитывается способность принятия сложных решений, не уступающих человеческим.

Одной из таких технологий является искусственный интеллект, способности которого отчасти превосходят человеческие [2]. Данная инновация способна выполнять задачи, сложность исполнения которых затруднительна как для обычного человека, так и для эксперта в той или иной области.

Благодаря своей многофункциональности и широкому спектру возможностей, научное сообщество начало предпринимать попытки интеграции искусственного интеллекта в различные сферы жизнедеятельности человека [3, 4]. Одной из таких сфер является строительство.

Первоначальные этапы интеграции данной технологии возложили на виды работ, которые не требуют большого количества трудозатрат и информации. Получив данные о проделанной работе и проведя анализ, экспертам удалось сделать вывод, что при должном развитии и вложении необходимых ресурсов, технология искусственного интеллекта способна семимильными шагами обогнать имеющиеся на данный момент инновации. Одними из положительных качеств интегрированного искусственного интеллекта в строительную индустрию выделяют:

- скорость и качество выполнения поставленных задач;
- повышенная эффективность в контроле за соблюдением техники безопасности на строительных площадках и предприятиях;
- экономическая выгода за счёт сокращения человеческой рабочей силы.

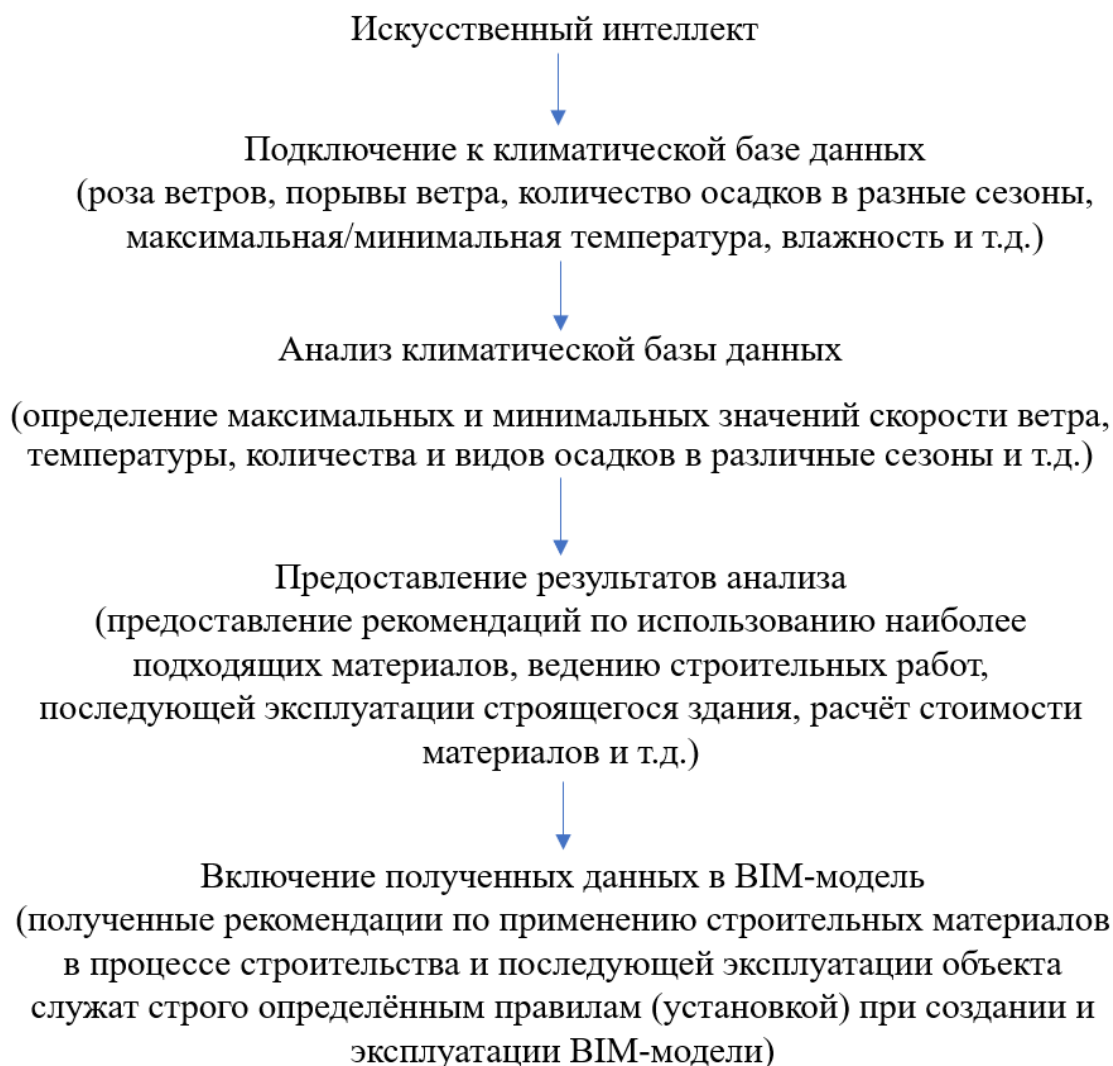
Проведённый анализ полученных данных показал, что технология искусственного интеллекта отлично подходит для интеграции в различные сферы жизнедеятельности человека, одна из таких сфер – строительство.

На данный момент наиболее востребованными и зарекомендовавшими себя как в научной, так и в профессиональной сфере инновациями являются [5]:

- BIM;
- лазерное сканирование;
- 3D-печать;
- Big Data;
- робототехника.

### **Пошаговый процесс взаимодействия искусственного интеллекта с BIM**

При интеграции искусственного интеллекта в технологию BIM появляется возможность разрабатывать, корректировать и в последующем эксплуатировать проекты зданий и сооружений с заложенными как геологическими, так и экономическими данными [6] (рисунок 1).



**Рисунок 1** – Пошаговая схема процесса работы технологии BIM с интегрированным искусственным интеллектом

## Пошаговый процесс взаимодействия искусственного интеллекта с лазерным сканированием

Интеграция искусственного интеллекта в технологию лазерного сканирования позволяет повысить точность сканирования объектов, уменьшается количество коллизий сканирования благодаря параллельному внедрению в информационную модель. Посредством независимости от светового дня искусственный интеллект, интегрированный в технологию лазерного сканирования, способен проводить выполнение работ в любое время суток, в отличие от обычного человека [7] (рисунок 2).



**Рисунок 2** – Демонстрация различия ведения рабочих процессов технологии лазерного сканирования с/без интегрированного искусственного интеллекта

При изучении интеграции искусственного интеллекта в технологию 3D-печати выделяются качества, способные раз и навсегда искоренить возникновение ошибок, связанных с человеческим фактором в данном направлении:

- полная автоматизация процесса создания модели объекта;
- построение 3D-объекта по имеющейся модели с контролем используемых материалов;
- корректировка возникающих коллизий по средством анализа данных, без стороннего программного вмешательства.

Внедрение искусственного интеллекта в технологию 3D-печати способно исключить данные проблемы посредством самостоятельного выявления неполадок и последующей их корректировке. Также данная интеграция способна в значительной мере повлиять на ход проведения печатных работ, параллельно контролируя толщину слоя печати, геометрические пропорции объекта и подбор печатного материала, что в свою очередь заменяет контроль и проверку рабочего процесса со стороны инженера, исключая допущение возникновения ошибок, связанных с человеческим фактором [8].

За счёт быстрой обработки большого количества данных технология искусственного интеллекта, интегрированного в Big Data, способна находить решения поставленных задач значительно быстрее, чем человеческий мозг. Одним из главных преимуществ данной интеграции является искоренение принятия ошибочных решений, связанных с человеческим фактором [9].

При интеграции искусственного интеллекта в робототехнику появляется возможность исключить появление ошибок. Данная интеграция положительно скажется как на первичной обработке данных, так и на последующей их проработке и корректировке в случае необходимости. Сокращается количество финансовых затрат на оплату человеческого труда, исключается возникновение ошибок, связанных с человеческим фактором, увеличивается продуктивность ведения работ, повышается качество выпускаемой продукции в случае интеграции на предприятиях [10].

### **Преимущества и недостатки**

Первопричинами использования современных технологий в разных отраслях жизнедеятельности человека являются упрощённость ведения работ, повышение внутригосударственных экономических показателей, безопасность людей, сохранение окружающей среды и эволюция. Рассматривая каждую из инноваций, следует учитывать преимущества и недостатки, имеющие большое влияние в среде, в которую они внедрены.

## **Искусственный интеллект в BIM**

### **Преимущества:**

- сокращение временных затрат на изучение и анализ исходных данных;
- скорость разработки проектов;
- автоматический расчёт нагрузок;
- изначальное заложение в проект материалов, соответствующих полученным данным (выдерживание нагрузок, соответствие климатическому району и требуемому сроку службы);
- подбор материалов согласно заложенной финансовой составляющей;
- учёт отрицательного влияния на окружающую среду при проведении работ;
- демонстрация опасных участков строительства, требующих контроль по соблюдению техник безопасности;

- повышение скорости проведения предпроектных и проектных работ;
- сокращение рисков возникновения ошибок, связанных с человеческим фактором;
- возможность развития внедрённых инноваций.

**Недостатки:**

- требуется дополнительная проверка полученных данных инженерами;
- сложность внедрения;
- нехватка квалифицированных специалистов в сфере искусственного интеллекта;
- финансовая дороговизна интеграции на первоначальных этапах;
- уменьшение количества рабочих мест.

### **Искусственный интеллект в лазерном сканировании**

**Преимущества:**

- увеличение точности сканирования;
- сокращение количества задействованных специалистов;
- уменьшение количества финансовых затрат с повышением прибыли;
- сокращение времени на проверку полученных данных;
- дополнение недостающих данных по средством анализа;
- обработка большого количества данных;
- независимость от светового дня, способность выполнять поставленные задачи круглые сутки;
- возможность последующего развития интегрированных инноваций.

**Недостатки:**

- требуется дополнительная проверка специалистами полученных данных;
- нехватка специалистов в сфере искусственного интеллекта;
- отсутствие доверия к эффективности выполнения поставленных задач со стороны специалистов;
- финансово затратное внедрение на первоначальных этапах;
- сокращение рабочих мест.

### **Искусственный интеллект в 3D-печати**

**Преимущества:**

- защита окружающей среды (возможность использования переработанных материалов без выброса вредных веществ);
- контроль печати объекта;
- создание модели объекта;
- корректировка возникающих в процессе выполнения работ ошибок и коллизий;
- скорость выполнения поставленных задач;
- сокращение количества отходов материалов;
- повышение качества производимой продукции;
- увеличение объёмов производства;
- повышение прибыли;
- возможность последующей эволюции интегрированных инноваций.

### **Недостатки:**

- задействование большого количества специалистов на первоначальных этапах наладки интеграции;
- нехватка специалистов в сфере искусственного интеллекта;
- сокращение рабочих мест;
- требуется проверка получаемых данных.

## **Искусственный интеллект в BigData**

### **Преимущества:**

- обработка большого количества данных;
- скорость обработки и анализа данных;
- собственное принятие решений;
- исключение возникновения ошибок, связанных с человеческим фактором;
- подстраивание под необходимые требования;
- предоставление наиболее оптимальных решений;
- уменьшение количества задействованных специалистов;
- повышение экономической составляющей;
- результативность выполнения поставленных задач.

### **Недостатки:**

- финансовые затраты на первоначальных этапах;
- недоверие со стороны специалистов;
- проверка специалистами полученного результата;
- нехватка квалифицированных инженеров в сфере искусственного интеллекта;
- сокращение количества рабочих мест.

## **Искусственный интеллект в робототехнике**

### **Преимущества:**

- исключение рисков возникновения ошибок, связанных с человеческим фактором;
- сокращение количества затрат на выполнение работ;
- скорость выполнения поставленных задач;
- автономность;
- повышения качества выполнения работ;
- уменьшение количества вредных выбросов в атмосферу.

### **Недостатки:**

- сокращение рабочих мест;
- нехватка специалистов;
- требуется контроль рабочего процесса.

Проведя анализ изученных инновационных технологий с интегрированным в них искусственным интеллектом, значение и важность которого играет важную роль в последующем развитии различных сфер деятельности человека, удалось выделить основные преимущества и недостатки данных интеграций.

### **Преимущества:**

- исключение влияния человеческого фактора на процесс выполнения работ;
- экономия финансовых затрат и ресурсов;
- скорость и качество выполнения работ;
- потенциал развития технологий;
- улучшение качества жизни человека;
- сохранение окружающей среды.

### **Недостатки:**

- уменьшение количества рабочих мест;
- дороговизна проведения работ по разработке и последующем внедрении на первоначальных этапах;
- нехватка специалистов;
- недоверие и настороженность со стороны населения.

### **Выводы**

Учитывая изученные данные по использованию инновационных технологий в интеграции с искусственным интеллектом, проведя анализ опубликованных трудов учёных и специалистов в различных сферах, следует сделать вывод. Каждая из инноваций, изученная в ходе проведения исследовательской работы, имеет большое количество преимуществ, способных в корне изменить ход развития технологий по всему миру. Ежедневное внедрение современных технологий в различные сферы жизнедеятельности человека способствуют ускоренному процессу эволюции науки и инженерии. Интеграция искусственного интеллекта с данными технологиями позволяет исключить возникновение фатальных ошибок как на строительных площадках, так и на крупных производствах. Экономия финансовых затрат как следствие применения интеграции позволяет увеличить прибыль компаний с сохранением и даже улучшением качества выполняемых работ. Сокращается количество случаев травмированности рабочих в процессе выполнения поставленных задач посредством контроля соблюдения техники безопасности. Появляется возможность не зависеть от времени суток, что позволяет увеличить объёмы работ с сохранением и даже сокращением поставленных сроков на выполнение. Помимо положительных качеств интеграция искусственного интеллекта в различные технологии строительной индустрии несёт за собой ответственность, возложение которой приходится на плечи учёных и инженеров. Имея как положительные, так и отрицательные отклики со стороны населения на внедрение и использование искусственного интеллекта в различных сферах жизнедеятельности человека, мировым государствам следует увеличить объёмы финансирования исследований, связанных с изучением и приспособлением искусственного интеллекта в жизнедеятельность человека.

### **Список использованных источников**

1. Каширипур, М. М. Возможности искусственного интеллекта в строительной индустрии / М. М. Каширипур, В. А. Николук // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – № 26 (1). – С. 163–178. – DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-163-178.

2. Киевска, К. Внедрение искусственного интеллекта в строительной отрасли и анализ существующих технологий / К. Киевска, С. Цюцюра // Технологический аудит и резервы производства. – 2021. – № 2. – С. 12–15.

3. Каширипур, М. М. Автоматический мониторинг для сложных сооружений и инфраструктуры города / М. М. Каширипур, В. М. Борейко // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. / сост. С. Н. Соболевская, Е. М. Жуковский. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 90–94. – URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/125165>.

4. Искусственный интеллект и аддитивные технологии: перспективы взаимодействия // IQB technologies. – URL: <https://blog.iqb.ru/ai-3d-printing-intersection/?ysclid=m6ixhtensc502604765> (дата обращения: 15.05.2025).

5. Искусственный интеллект в строительстве. – URL: <https://bim-info.ru/articles/iskusstvennyu-intellekt-v-stroitelstve/?ysclid=m6iy8lgea3788520490> (дата обращения: 15.05.2025).

6. Каширипур, М. М. Разработка подходящей методологии управления строительными проектами / М. М. Каширипур, А. М. Альмалеги // Инжиниринг и экономика: современное состояние и перспективы развития : сборник материалов студенческой науч.-техн. конф. в рамках XX Междунар. науч.-техн. конф. БНТУ «Наука – образованию, производству и экономике» и 78-й студенческой науч.-техн. конф. БНТУ, 4–5 мая 2022 г. / редкол.: О. С. Голубова [и др.] ; сост. Н. А. Пашкевич. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 78–83. – URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/114410>.

7. Как с помощью лазерного 3D-сканирования сократить риски при строительстве и реконструкции зданий и объектов. – URL: <https://digital-build.ru/kak-s-pomoshhyu-lazernogo-3d-skanirovaniya-sokratit-riski-pri-stroitelstve-i-rekonstrukcii/?ysclid=m6iy1xrd6h211821245> (дата обращения: 15.05.2025).

8. Каширипур, М. М. Новые тенденции и инновации в строительстве: строительство с помощью 3D принтера / М. М. Каширипур, С. Б. Гарагозов // Инжиниринг и экономика: современное состояние и перспективы развития : сборник материалов студенческой науч.-техн. конф. в рамках XX Междунар. науч.-техн. конф. БНТУ «Наука – образованию, производству и экономике» и 78-й студенческой научно-технической конференции БНТУ, 4–5 мая 2022 г. / редкол.: О. С. Голубова [и др.] ; сост. Н. А. Пашкевич. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 94–99. – URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/114413>.

9. Каширипур, М. М. Технологии четвертой волны в строительстве и архитектуре: от идеи до реализации. Часть 3: примеры применения технологий четвертой волны в строительстве и архитектуре / М. М. Каширипур // Градостроительство и архитектура. – 2024. – Т. 14. – № 4. – С. 171–179. – DOI: 10.17673/Vestnik.2024.04.24.

10. Каширипур, М. М. Автоматический мониторинг для сложных сооружений и инфраструктуры города / М. М. Каширипур, В. М. Борейко // Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : материалы III Междунар. науч.-техн. конф. / сост. С. Н. Соболевская, Е. М. Жуковский. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 90–94. – URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/125165>.

## МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ГОМОГЕНИЗАЦИИ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРЫ БЕТОННОГО КОМПОЗИТА

*В. В. Кравченко*

*К. т. н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов,  
Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь,  
e-mail: vvkrauchenko@g.bstu.by*

### Реферат

Прогнозирование жесткостных характеристик бетона является нерешенной проблемой современной теории бетоноведения, что обусловлено его сложной гетерогенной структурой. Существующие подходы основаны на многоуровневом представлении его структуры и методах теории эффективной среды, принимая допущение о том, что все фазы бетонного композита обладают сферической формой и упругим поведением. В статье представлена усовершенствованная многоуровневая модель гомогенизации гетерогенной структуры бетонного композита, в основе которой лежит представление структуры цементного камня в виде воксельной модели, для которой применяют численные методы гомогенизации, позволяющие учитывать произвольную геометрическую форму фаз и нелинейное поведение фазы продуктов гидратации, а также итерационный подход на основе дифференциальной схемы теории эффективной среды при определении жесткостных характеристик бетонного композита, позволяющий наиболее полно учитывать особенности его структуры.

**Ключевые слова:** бетон, цементный камень, гетерогенная структура, многоуровневая схема, гомогенизация.

### Введение

Существенное влияние на долговечность бетона оказывает процесс возникновения и развития в его структуре дефектов в результате внешнего силового воздействия или развития собственных деформаций усадки цементного камня в условиях различного рода ограничений, самым распространенным из которых являются заполнители для бетона. Для прогнозирования собственных деформаций бетона прежде всего необходимо получить представление о его жесткостных характеристиках, к которым относят модуль упругости Юнга, коэффициент Пуассона и др.

Определение жесткостных характеристик бетона является нерешенной проблемой современной теории бетоноведения, поскольку бетон, на первый взгляд, представляет классический композиционный материал, структуру которого можно представить в виде цементной матрицы (называемая в технической литературе – цементным камнем) с распределенными в ней включениями в виде зерен заполнителя. Однако цементная матрица сама является поликристаллическим композитом, структура которой формируется в процессе гидратации вя-

жущего. Другой ключевой особенностью цементного камня является то, что его основная фаза – гидросиликат кальция – обладает ярко выраженным вязкоупругим поведением, что является основной предполагаемой причиной ползучести в бетонных композитах.

Существующие подходы к определению жесткостных характеристик бетона включают две концепции [1]:

1) Структуру бетона представляют в виде многоуровневой (также называемой масштабной или иерархической, англ. – multiscale) схемы, получаемой разделением его структуры на отдельные гетерогенные уровни, определяемые морфологией фаз входящих в их состав.

2) На каждом гетерогенном уровне определяют так называемые эффективные характеристики, используя аналитическую гомогенизацию, включающей методы теории эффективной среды (англ. – Effective Medium Theory) [2] с последующей передачей информации от нижележащего гетерогенного уровня к вышележащему.

Для определения эффективного тензора жесткости ( $\mathbb{C}_{eff}$ ) в методах аналитической гомогенизации используют следующую зависимость [3]:

$$\mathbb{C}_{eff} = (\sum_r f_r \mathbb{C}_r : \mathbb{A}_r) : (\sum_r f_r \mathbb{A}_r)^{-1}, \quad (1)$$

где  $\mathbb{C}_r$  – тензор жесткости 4-го ранга  $r$ -ой фазы ( $r = 1, 2, \dots, n$ );  $f_r$  – объемное содержание (концентрация)  $r$ -ой фазы в репрезентативном объеме;  $\mathbb{A}_r$  – тензор 4-го ранга концентрации деформаций  $r$ -ой фазы; « : » – двойное скалярное произведение (свертка) тензоров.

В наиболее распространенных методах аналитической гомогенизации (например, Mori-Tanaka Model и Self-Consistent Model) тензор концентрации деформаций ( $\mathbb{A}_r$ ) определяют из решения задачи Эшелби для эллипсоидного упругого включения (англ. – Eshelby's inclusion problem) [2].

В рамках представленного подхода существует достаточно большое количество расчетных моделей, в большинстве из которых для упрощения вычислений принято допущение, что все фазы бетонного композита на каждом из его гетерогенных уровней обладают сферической формой.

Это существенное допущение противоречит как модели микроструктуры цементного камня, по которой частицы твердой фазы, состоящей из зерен цемента и продуктов гидратации, скорее характеризуются произвольной геометрической формой, так и бетонного композита, в которой для зерен крупного заполнителя из горных пород, получаемых путем дробления, больше подходит эллипсоидная форма.

В статье рассмотрены основные принципы многоуровневой модели гомогенизации гетерогенной структуры бетонного композита, направленные на совершенствование существующих подходов к определению его эффективных жесткостных характеристик.

### **Многоуровневая схема бетонного композита**

В данной работе принята трехуровневая схема бетонного композита, состоящая из трех гетерогенных уровней:

1) Уровень 1: продукты гидратации и негидратированный цемент, состоящий из клинкерных минералов.

2) Уровень 2: цементный камень, состоящий из продуктов гидратации и негидратированного цемента, образующих частицы твердой фазы, поровое пространство между которыми заполнено водой и газообразной фазой.

3) Уровень 3: бетон, состоящий из цементного камня, зерен заполнителя и транзитной зоны вокруг них.

## **Принципы гомогенизации структуры бетонного композита**

### *Уровень 1*

На данном уровне наиболее подходящим является метод Self-Consistent Model [2], который применяют для поликристаллических структур, не обладающих ярко выраженной фазой матрицы, что соответствует структуре продуктов гидратации и негидратированного цемента.

### *Уровень 2*

Цементный камень обладает чрезвычайно сложной неоднородной структурой из частиц твердой фазы в виде зерен цемента и образующихся на их поверхности продуктов гидратации, обладающих произвольной геометрической формой и распределяемых в его объеме случайным образом, и порового пространства между ними, заполненного жидкой и газообразной фазой.

Гомогенизация характеристик такой структуры может быть выполнена методами численной гомогенизации, включающей метод на основе конечно-элементного анализа [4], и метод на основе быстрого преобразования Фурье [5], одно из преимуществ которых – не ограничение геометрической формой включений, в отличие от методов аналитической гомогенизации.

Основным препятствием к использованию данных методов является проблема репрезентативного объема цементного камня, представляемого в виде структурно-геометрической модели, называемой элементарной ячейкой (англ. – unit cell), содержащей данные не только о геометрических характеристиках фаз, но и их расположении в объеме, что является довольно сложной задачей для структуры цементного камня.

Эффективным решением обозначенной проблемы репрезентативного объема является представление структуры цементного камня в виде дискретной воксельной модели [6], преимуществом которой является возможность воспроизводить произвольную геометрическую форму включений в виде набора вокселей в заданной области анализируемого объема.

Для метода на основе конечно-элементного анализа на основе воксельной модели цементного камня генерируют конечно-элементную сетку, преобразованием каждого вокселя может в шестигранный восьмиузловой изопараметрический конечный элемент (англ. – hexahedron) с тремя степенями свободы в каждом узле при определении перемещений и одной степенью свободы при определении напряжений. В методе на основе преобразования Фурье воксельную модель преобразуют в числовые массивы, содержащие значения механических характеристик, поэтому для данного метода не требуется конечно-элементная сетка, что является одним из его преимуществ.

Вариационная (слабая) формулировка для метода на основе конечно-элементного анализа может быть получена из принципа возможных перемещений [7]:

$$\int_{\Omega} \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(\tilde{\mathbf{u}}) : \mathbb{C}(\mathbf{x}) : \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(\delta\tilde{\mathbf{u}}) d\Omega = - \int_{\Omega} \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} : \mathbb{C}(\mathbf{x}) : \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(\delta\tilde{\mathbf{u}}) d\Omega; \quad (2)$$

$$\forall(\tilde{\mathbf{u}}, \delta\tilde{\mathbf{u}}) \in H^1(\Omega),$$

где  $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$  – тензор 2-го ранга макроскопических деформаций, постоянных в любой точке репрезентативного объема  $\Omega$ ;  $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$  – тензор 2-го ранга микроскопических деформаций, обусловленных периодическими локальными флуктуациями  $\tilde{\mathbf{u}}$ , возникающих в репрезентативном объеме вследствие неоднородности фаз;  $\mathbf{x}$  – радиус-вектор произвольной точки в репрезентативном объеме.

Базовым уравнением для метода на основе преобразования Фурье является уравнение Липпманна-Швингера [5]:

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}) = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} - \Gamma_0(\mathbf{x}) * \boldsymbol{\tau}(\mathbf{x}), \quad (3)$$

где  $\Gamma_0$  – оператор (тензор 4-го ранга) Грина;  $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{x})$  – поляризационный тензор 2-го ранга, соответствующий напряжениям, возникающим вследствие неоднородности среды «\*» – операция свертки функций.

Уравнение (3) представляет собой нелинейное интегральное уравнение, для решения которого используют итерационные методы и преобразование Фурье для вычисления свертки функций:

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{k+1}(\boldsymbol{\omega}) = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} - \hat{\Gamma}_0(\boldsymbol{\omega}) : \hat{\boldsymbol{\tau}}^k(\boldsymbol{\omega}), \quad (4)$$

где  $\boldsymbol{\omega}$  – частота в пространстве Фурье;  $k$  – итерация линеаризации.

Методы численной гомогенизации позволяют также учитывать нелинейное поведение фазы продуктов гидратации, для которой напряженное-деформированное состояние описывается интегралом Стилтеса [8].

Для решения этой задачи в методе на основе конечно-элементного анализа определяют еще одну линейную форму, добавляя ее к правой части вариационной постановки (2), в которой интеграл Стилтеса представлен в численном виде, используя метод трапеций:

$$L^S(\delta\tilde{\mathbf{u}}) = - \int_{\Omega} (\boldsymbol{\sigma}_{i-1} + (\boldsymbol{\varepsilon}_{i-1} + \mathbf{h}) : \mathbb{J}_{i,i-1/2}^{-1}) : \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}(\delta\tilde{\mathbf{u}}) d\Omega; \quad \forall \mathbf{x} \in \Omega_{hp}; \quad (5)$$

$$\mathbf{h} = \sum_{j=1}^{i-1} [(\mathbb{J}_{i,j-1/2} - \mathbb{J}_{i-1,j-1/2}) : \Delta\boldsymbol{\sigma}_j],$$

где  $\Omega_{hp}$ , – подобласть конечно-элементной сетки, соответствующая фазе, продуктов гидратации.

В методе на основе преобразования Фурье она решается переопределением исходного выражения для поляризационного тензора, добавляя в него аналогичное численное представление интеграла Стилтеса, получаемого методом трапеций:

$$\boldsymbol{\tau}_i^k = \boldsymbol{\sigma}_i^k - \mathbb{C}_0 : \boldsymbol{\varepsilon}_i^k = \boldsymbol{\sigma}_{i-1} + \Delta\boldsymbol{\sigma}_i^k - \mathbb{C}_0 : \boldsymbol{\varepsilon}_i^k;$$

$$\boldsymbol{\sigma}_0 = \mathbf{0}; \quad \boldsymbol{\varepsilon}_i^0 = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}; \quad \forall \mathbf{x} \in \Omega_{hp}; \quad (6)$$

$$\Delta\boldsymbol{\sigma}_i^k = [\boldsymbol{\varepsilon}_i^k - \boldsymbol{\varepsilon}_{i-1} - \sum_{j=1}^{i-1} (\mathbb{J}_{i,j-1/2} - \mathbb{J}_{i-1,j-1/2}) : \Delta\boldsymbol{\sigma}_j] : (\mathbb{J}_{i,i-1/2})^{-1}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_0 = \mathbf{0},$$

где  $\Omega_{hp}$ , – подобласть воксельного объема, соответствующая фазе, продуктов гидратации.

### Уровень 3

В современном представлении бетон – трехфазный композит, состоящий из цементного камня, зерен заполнителя и транзитной зоны цементного камня вокруг них. Однако заполнитель в большинстве случаев состоит из нескольких видов с разными жесткостными характеристиками (например, обычно его разделяют на мелкий и крупный заполнитель) в виде зерен различного размера и формы, в результате чего бетонный композит фактически является многофазовой системой.

Одним из наиболее эффективных подходов к определению жесткостных характеристик такой системы состоит в представлении ее в виде двухфазной композитной системы «матрица-включение».

Поскольку транзитная зона цементного камня образуется только на границе между зернами заполнителя и цементным камнем, ее можно рассматривать как неотъемлемую часть заполнителя в виде оболочки вокруг каждого зерна, вместе с ним образующее композитное включение – эффективную частицу. На данном уровне принято допущение, что зерна мелкого заполнителя рассматривают как сферические включения, а зерна крупного заполнителя – как эллипсоидные. Другое принятое допущение предполагает, что транзитная образует равномерный слой вокруг каждой частицы заполнителя, который пропорционален ее объему. Соответственно для определения эффективных жесткостных характеристик сферических эффективных частиц используют метод Generalized Self-Consistent model [2], а для эллипсоидных эффективных частиц – Mori-Tanaka Model [2].

В результате исходная система преобразуется к композитной системе «матрица – эффективные частицы». Далее применяют итерационный метод, по которому на каждой  $i$ -й итерации определяют эффективные жесткостные характеристики двухфазной композитной системы «матрица – эффективная частица  $i$ -го размера». Гомогенная среда с эффективными жесткостными характеристиками, определенными на  $i$ -й итерации, является фазой матрицы для  $i+1$ -й итерации. Соответственно эффективные жесткостные характеристики для композита в целом получают на последней итерации. Для первой итерации матрицей является – цементный камень. Количество итераций определяют из зернового состава заполнителя, которое подбирают таким образом, чтобы содержание каждой фракции не превышало 5 %, что обусловлено проблемой единичной концентрации включений (англ. – dilute concentration). Итерационное разделение позволяет исключить совместное влияние эффективных частиц разных фракций на напряженно-деформированное состояние композитной системы.

Для двухфазных композитных систем, в которых включение содержится в единичной концентрации, одним из наиболее подходящих методов для определения эффективных характеристик является дифференциальная схема (англ. – differential scheme) теории эффективной среды [2]:

$$\frac{dC_{eff}}{dc} = \frac{1}{1-c} (C_{inc} - C_{eff}) : A_{inc}, \quad (7)$$

где  $C_{inc}$  – тензор жесткости 4-го ранга  $i$ -ой эффективной частицы;  $A_r$  – тензор 4-го ранга концентрации деформаций  $i$ -ой эффективной частицы;  $c$  – концентрация эффективных частиц  $i$ -ой фракции.

## **Выводы**

Представлена усовершенствованная многоуровневая модель гомогенизации гетерогенной структуры бетонного композита, в основе которой лежат следующие основные принципы:

1) Структуру цементного камня представляют в виде воксельной модели, для которой применяют численные методы гомогенизации, что позволяет учитывать произвольную геометрическую форму его фаз и нелинейное поведение фазы продуктов гидратации.

2) Для гомогенизации бетонного композита применяют итерационный подход на основе дифференциальной схемы теории эффективной среды, при котором количество итераций определяют из зернового состава заполнителя, подбирая их таким образом, чтобы содержание каждой фракции не превышало 5 %. Такой подход позволяет исключить совместное влияние частиц разных фракций на напряженно-деформированное состояние композитной системы.

## **Список использованных источников**

1. Olivier, B. A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials / B. Olivier, F.-J. Ulm, E. Lemarchand // *Cement and Concrete Research*. – 2003. – Vol. 33, iss. 9. – P. 1293–1309. – DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00039-5.

2. Dvorak, G. J. *Micromechanics of Composite Materials* / G. J. Dvorak. – New York : Springer Science & Business Media, 2012. – 460 p. – DOI: 10.1007/978-94-007-4101-0.

3. Zaoui, A. Continuum micromechanics: survey / A. Zaoui // *Journal of Engineering Mechanics*. – 2002. – Vol. 128, iss. 8. – P. 808–816. – DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:8(808).

4. Yvonnet, J. *Computational Homogenization of Heterogeneous Materials with Finite Elements* / J. Yvonnet. – New York : Springer Cham, 2019. – 223 p. – DOI: 10.1007/978-3-030-18383-7.

5. Lucarini, S. FFT based approaches in micromechanics: fundamentals, methods and applications / S. Lucarini, M. V. Upadhyay, J. Segurado // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 30, iss. 023002. – P. 1–96. – DOI: 10.1088/1361-651X/ac34e1.

6. Кравченко, В. В. Моделирование микроструктуры цементного камня на основе воксельной модели / В. В. Кравченко // *Вестник БрГТУ*. – 2024. – № 1. – С. 14–18. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-14-18.

7. Michel, J. C. Effective properties of composite materials with periodic microstructure: a computational approach / J. C. Michel, H. Moulinec, P. Suquet // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 1999. – Vol. 172, iss. 1–4. – P. 109–143. – DOI: 10.1016/S0045-7825(98)00227-8.

8. Bažant, Z. P. *Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures* / Z. P. Bažant, M. Jirásek. – Dordrecht : Springer Science, 2018. – 918 p. – DOI: 10.1007/978-94-024-1138-6.

## АНАЛИЗ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ НЕДВИЖИМОСТИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

*А. Ю. Кулак<sup>1</sup>, Д. А. Гурбич<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *М. т. н., старший преподаватель кафедры экономики и организации строительства, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: angela-h-89@yandex.by*

<sup>2</sup> *Студентка IV курса группы Н-16, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: daryagurbich@yandex.ru*

### **Реферат**

Жизненный цикл объектов недвижимости представляет собой последовательность этапов, через которые проходит недвижимость от момента ее создания до окончательной ликвидации. В контексте Беларуси особенности жизненного цикла объектов недвижимости обусловлены как экономическими, так и социальными факторами, а также законодательными и культурными аспектами, характерными для страны.

**Ключевые слова:** недвижимость, жизненный цикл, этап, проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция, снос.

### **Введение**

В последние десятилетия Республика Беларусь переживает значительные изменения в сфере недвижимости, что связано с переходом к рыночной экономике, изменением законодательства и ростом интереса к инвестициям в недвижимость. Эти изменения влияют на все этапы жизненного цикла объектов недвижимости, включая проектирование, строительство, эксплуатацию, реконструкцию и снос.

Одной из ключевых особенностей жизненного цикла недвижимости в Республике Беларусь является влияние государственной политики на рынок. Государственные программы, направленные на развитие жилищного строительства и улучшение жилищных условий граждан, оказывают значительное влияние на спрос и предложение на рынке недвижимости. Кроме того, в стране существует ряд нормативных актов, регулирующих строительство и эксплуатацию объектов недвижимости, что также накладывает отпечаток на их жизненный цикл.

Таким образом, данная работа направлена на анализ жизненного цикла объектов недвижимости в Республике Беларусь, выявление его особенностей и проблем, а также на предложение рекомендаций по оптимизации процессов, связанных с недвижимостью, с целью повышения эффективности и устойчивости данного сектора экономики.

### **Этапы жизненного цикла недвижимости**

#### **1 Проектирование**

Проектирование объектов недвижимости в Республике Беларусь начинается с разработки концепции и проектной документации. Важным аспектом является

соблюдение норм и стандартов, установленных белорусским законодательством. Процесс включает в себя:

- Исследование рынка и потребностей.
- Разработка архитектурного проекта.
- Получение разрешений и согласований от государственных органов.

## 2 Строительство

Строительство объектов недвижимости в Республике Беларусь регулируется рядом законов и нормативных актов. Важные моменты включают:

- Выбор подрядчиков и поставщиков.
- Контроль за качеством строительных работ.
- Соблюдение сроков и бюджета.

## 3 Эксплуатация

После завершения строительства объект недвижимости переходит в стадию эксплуатации. Этот этап включает в себя:

- Управление объектом (техническое обслуживание, безопасность).
- Аренда или продажа недвижимости.
- Оценка эффективности использования.

## 4 Реконструкция

С течением времени объекты недвижимости могут требовать реконструкции или модернизации. В Республике Беларусь это может быть вызвано:

- Изменением потребностей рынка.
- Устареванием технологий.
- Необходимостью повышения энергоэффективности.

## 5 Снос

Снос объектов недвижимости происходит, когда они становятся непригодными для эксплуатации или не соответствуют современным требованиям. В Республике Беларусь процесс сноса регулируется законодательством и требует получения соответствующих разрешений.

### **Факторы, влияющие на принятие решений в управлении жизненным циклом объектов недвижимости**

Факторы, влияющие на принятие решений в управлении жизненным циклом объектов недвижимости, могут быть разделены на несколько категорий: экономические, технические, социальные и правовые. Ниже приведен перечень этих факторов и подробное описание каждого из них.

#### 1 Экономические факторы

Рентабельность – одним из основных экономических факторов, влияющих на принятие решений в управлении жизненным циклом объектов недвижимости, является рентабельность инвестиций. При принятии решений необходимо учитывать ожидаемую доходность от объекта недвижимости и его стоимость.

Стоимость эксплуатации – при принятии решений необходимо учитывать стоимость эксплуатации объекта недвижимости на протяжении всего его жизненного цикла. Это включает в себя затраты на обслуживание, ремонт, замену компонентов и другие операционные расходы.

Рыночная цена – при принятии решений необходимо учитывать текущую рыночную цену объекта недвижимости и его потенциальную стоимость в будущем. Это позволяет оценить потенциальные доходы от продажи объекта или его стоимость при аренде.

Налоги и сборы – при принятии решений необходимо учитывать налоговые и сборные обязательства, связанные с объектом недвижимости. Это может включать налог на недвижимость, налог на прибыль от аренды и другие налоговые обязательства.

## 2 Технические факторы

Техническое состояние – при принятии решений необходимо учитывать техническое состояние объекта недвижимости. Это включает в себя оценку состояния строительных конструкций, систем электроснабжения, отопления, вентиляции и других технических систем.

Технологический прогресс – при принятии решений необходимо учитывать технологический прогресс и возможность внедрения новых технологий в управление объектами недвижимости. Это может включать в себя использование систем умного дома, автоматизации процессов и других инноваций.

Энергоэффективность – при принятии решений необходимо учитывать энергоэффективность объекта недвижимости. Это включает в себя оценку энергетической эффективности строительных конструкций, систем отопления, вентиляции, кондиционирования и других систем.

Устаревание – при принятии решений необходимо учитывать возможное устаревание объекта недвижимости. Это может быть связано с изменением требований рынка, технологическим прогрессом или изменением потребностей пользователей.

## 3 Социальные факторы

Рыночный спрос – при принятии решений необходимо учитывать рыночный спрос на объект недвижимости. Это включает в себя анализ потенциальных арендаторов или покупателей и их потребностей.

Локация – при принятии решений необходимо учитывать локацию объекта недвижимости. Это может включать в себя близость к транспортным магистралям, наличие развитой инфраструктуры, доступность культурных и образовательных учреждений и другие факторы, которые могут быть важны для потенциальных арендаторов или покупателей.

Демографические тенденции – при принятии решений необходимо учитывать демографические тенденции, такие как рост населения, изменение его состава и другие факторы, которые могут влиять на спрос на объект недвижимости.

Социальная ответственность – при принятии решений необходимо учитывать социальную ответственность и влияние объекта недвижимости на окружающую среду и общество. Это может включать в себя использование экологически чистых материалов, энергоэффективные технологии и другие меры по снижению негативного воздействия на окружающую среду.

#### 4 Правовые факторы

Законодательство – при принятии решений необходимо учитывать действующее законодательство, связанное с управлением объектами недвижимости. Это может включать в себя требования по безопасности, энергоэффективности, пожарной безопасности и другие нормативные акты.

Регулятивные ограничения – при принятии решений необходимо учитывать регулятивные ограничения, такие как правила зонирования, ограничения по использованию земельных участков и другие ограничения, которые могут влиять на использование объекта недвижимости.

Права собственности – при принятии решений необходимо учитывать права собственности на объект недвижимости. Это может включать в себя анализ правового статуса объекта, наличие обременений и других правовых ограничений.

Каждый из этих факторов имеет свое значение и может оказывать влияние на принятие решений в управлении жизненным циклом объектов недвижимости. Важно учитывать все эти факторы при анализе и планировании управления объектами недвижимости, чтобы принять обоснованные и эффективные решения.

### **Специфика белорусского рынка недвижимости**

Белорусский рынок недвижимости представляет собой уникальную экосистему, формируемую под воздействием различных экономических, социальных и политических факторов. В этом разделе приведены ключевые аспекты, определяющие специфику данного рынка.

#### **1 Экономические условия**

Экономика Республики Беларусь имеет свои особенности, которые влияют на рынок недвижимости. В условиях переходной экономики, где государственное регулирование играет значительную роль, наблюдается высокая степень централизации. Это приводит к тому, что многие аспекты рынка, такие как цены на жилье и аренду, регулируются государственными органами. В результате рынок недвижимости в Республике Беларусь менее подвержен колебаниям, характерным для более либеральных экономик.

#### **2 Государственное регулирование**

Государственное регулирование в Республике Беларусь охватывает множество аспектов, включая строительство, продажу и аренду недвижимости. Существуют строгие нормы и правила, касающиеся проектирования и строительства жилых и коммерческих объектов. Это может как способствовать качеству строительства, так и замедлять процесс ввода новых объектов в эксплуатацию.

#### **3 Социальные факторы**

Социальные факторы, такие как уровень доходов населения, демографические изменения и миграционные процессы, также оказывают значительное влияние на рынок недвижимости. В последние годы наблюдается тенденция к уве-

личению спроса на жилье в крупных городах, таких как Минск, что связано с ростом урбанизации и улучшением жизненных условий.

#### **4 Типы недвижимости**

На белорусском рынке недвижимости можно выделить несколько основных типов объектов: жилые, коммерческие и промышленные. Жилые объекты, в свою очередь, делятся на новостройки и вторичное жилье. В последние годы наблюдается рост интереса к новостройкам, что связано с улучшением качества строительства и доступностью ипотечного кредитования.

#### **5 Ценовые тенденции**

Цены на недвижимость в Республике Беларусь имеют свои особенности. В отличие от многих стран, где цены на жилье могут резко колебаться, в Беларуси они более стабильны. Однако в последние годы наблюдается рост цен на жилье, что связано с увеличением спроса и ограниченным предложением.

#### **6 Инвестиционная привлекательность**

Инвестиционная привлекательность белорусского рынка недвижимости также заслуживает внимания. Несмотря на определенные риски, связанные с политической и экономической ситуацией в стране, рынок недвижимости остается интересным для инвесторов, особенно в сегменте коммерческой недвижимости.

Специфика белорусского рынка недвижимости формируется под воздействием множества факторов, включая экономические условия, государственное регулирование и социальные изменения. Понимание этих особенностей является ключевым для успешного анализа и прогнозирования тенденций на рынке недвижимости в Республике Беларусь.

#### **Выводы**

Жизненный цикл объектов недвижимости в Республике Беларусь имеет свои особенности, обусловленные законодательными, экономическими и социальными факторами. Понимание этих особенностей важно для успешного управления недвижимостью и принятия обоснованных инвестиционных решений. В будущем, с развитием рынка и изменением законодательства, можно ожидать дальнейших изменений в жизненном цикле объектов недвижимости в стране.

#### **Список использованных источников**

1. Вечер, Н. Ф. Инвестиции в коммерческую недвижимость. Жизненный цикл объекта / Н. Ф. Вечер, А. Н. Ольховский. – СПб. : Бизнес-Пресса, 2015. – 163 с.
2. Горемыкин, В. А. Экономика и управление недвижимостью : учеб. / В. А. Горемыкин. – М. : МГИУ, 2007. – 345 с.
3. Озеров, Е. С. Экономический анализ и оценка недвижимости: монография / Е. С. Озеров – СПб. : Изд-во «МКС», 2007. – 536 с.
4. Тэпман, Л. Н. Оценка недвижимости: учебное пособие для вузов / Л. Н. Тэпман. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 303 с.

## ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО ОСНОВАНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ ОСАДКИ ФУНДАМЕНТА

*П. С. Пойта<sup>1</sup>, Н. Н. Шалобыта<sup>2</sup>, Т. П. Шалобыта<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Д. т. н., профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций  
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,  
e-mail: ppsbrest@mail.ru*

<sup>2</sup>*К. т. н., проректор по научной работе УО «Брестский государственный  
технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nnshalobyta@mail.ru*

<sup>3</sup>*К. т. н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов  
УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,  
e-mail: t\_shalobyta@mail.ru*

### Реферат

Осадка фундаментов является одной из ключевых проблем в строительстве, особенно в условиях слабых грунтов. Для повышения несущей способности оснований и снижения осадки широко применяются искусственные основания, такие как песчаные подушки, грунтовые сваи, геосинтетические материалы и другие методы укрепления. Однако до сих пор недостаточно изучено влияние мощности искусственного основания на величину осадки фундамента. В статье рассмотрены вопросы, связанные с определением осадки плитного фундамента, расположенного на искусственном основании большой мощности, выполненном из песчано-гравийной смеси. Установлено влияние деформируемости этого слоя на общую осадку фундамента, определены пределы значений модуля деформации и давления с учетом и без учета давления от песчано-гравийной смеси на величину безопасной осадки плитного фундамента.

**Ключевые слова:** фундаменты, осадки фундаментов, напряженно-деформированное состояние, искусственное основание, модуль деформации.

### Введение

Среди большого количества задач, которые необходимо решить при проектировании фундаментов зданий и сооружений, важнейшей является уменьшение и даже исключение осадок, в том числе и неравномерных, влияющих на величину напряжений и деформаций в надземных конструкциях здания или сооружения [1–3].

Естественно, для решения этой задачи немаловажное значение имеет характер залегания слоев грунта, используемых в качестве оснований фундаментов. В этом аспекте большой интерес представляют собой инженерно-геологические условия строительных площадок Юго-Западного микрорайона № 1 (ЮЗМР – 1) г. Бреста. Территория микрорайона представлена значительным числом генетических типов отложений: почвенными образованиями (*siv*), аллювиальными и озерно-болотными (*a, l, b IV*) и озерно-аллювиальными отложениями (*l, a, III P<sub>2</sub>*). Особенностью геологического строения рассматриваемой территории является

наличие слабых грунтов непосредственно у поверхности мощностью до 1 м, а также их присутствие на более значительной глубине (6–7 м) от поверхности мощностью 0,2–2,0 м. Наличие слабых грунтов у дневной поверхности особых проблем не вызывает, т. к. они легко удаляются либо уплотняются. При их удалении возникает необходимость устройства значительной по мощности песчано-гравийной подушки. Для ее устройства использованы песчано-гравийные смеси (ПГС), гранулометрический состав которых приведен в таблице 1.

**Таблица 1** – Гранулометрический состав песчано-гравийной подушки

Наименование смеси	Размеры частиц, мм					
	Содержание фракций, %					
Песок гравелистый	> 5,0	5,0–2,0	2,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	< 0,1
	11,94	18,48	35,02	20,86	10,91	2,79

### Методы и результаты исследований

В соответствии с классификацией по ГОСТ 25100-2020 [4], исследуемые смеси относятся к гравелистым пескам. Параметр максимальной неоднородности получен равным  $U_{max} = 76,8$ . Это означает, что данные грунты повышенной неоднородности. Следовательно, при оптимальной влажности данные грунты должны хорошо уплотняться. Однако, при реальном проектировании фундаментов, плотность песчано-гравийной смеси принята  $\rho = 1,6 \text{ т/м}^3$ . Угол внутреннего трения  $\varphi = 37^\circ$ . Наши испытания по определению прочности, плотности смесей при коэффициенте уплотнения  $k_{com} = 0,95$  показали, что  $\varphi = 29^\circ$  и  $\rho = 1,92 \text{ т/м}^3$ . Угол естественного откоса получен в пределах  $29...31^\circ$ . Следует отметить, что при  $\rho = 1,6 \text{ т/м}^3$ , смеси по плотности сложения относятся к рыхлым и тогда сомнительно значение модуля деформации, равное  $20,0 \text{ МПа}$ . Как видно, характеристики песчано-гравийной смеси, принятые при проектировании фундаментов зданий и сооружений весьма значительно расходятся с опытными данными, что, очевидно, требует детального анализа деформируемости под нагрузкой этого искусственного слоя. Предварительные расчеты показали, что до 54 % общей осадки фундамента приходится именно на осадку за счет деформаций песчано-гравийной подушки.

Отсюда следует, что влияние мощности искусственного слоя на осадку плитного фундамента весьма значительно в обеспечении надежности и долговечности сооружений. Вместе с тем, анализ факторов, влияющих на осадку фундамента, должен быть основан на комплексном подходе, учитывающем все особенности совместной работы системы «основание – фундамент – сооружение», в том числе и конкретные условия строительной площадки.

С учетом этого расчетная схема основания принята в виде линейно-деформируемого полупространства [5], с осредненным в пределах сжимаемого слоя  $H$  коэффициентом Пуассона и модуля деформации грунта основания  $E_{пр}$  с корректирующим множителем  $m_E$ , равным

$$m_E = \frac{\omega'_{cp}}{\omega_{cp}}, \quad (1)$$

где  $\omega_{cp}$  – коэффициент, определяемый в зависимости от отношения сторон фундамента  $n = l/b$  и толщины сжимаемого слоя основания  $H$  к полуширине фундамента  $b$

$$m' = \frac{2H}{b}, \quad (2)$$

$\omega_{cp}'$  – коэффициент, определяемый по таблицам для  $m' = \infty$  в зависимости от отношения сторон фундамента  $n = l/b$ .

Данная расчетная схема используется для определения внутренних усилий в фундаментной плите и последующего ее армирования.

Как показали расчеты, среднее давление на грунт оснований меньше расчетного сопротивления грунта, то есть условие  $P < R$  выполняется.

Мощность сжимаемой толщи определена в соответствии с [4] при  $5,0 < b \leq 20,0$  м путем линейной интерполяции значений

$$\sigma_{zp} = 0,5P_{zq} \text{ и } \sigma_{zp} = 0,2P_{zq}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{zp}$  – дополнительное вертикальное нормальное напряжение на глубине  $H$ ;

$P_{zq}$  – вертикальное давление от собственного веса грунта.

Модуль деформации грунтов основания  $E_{np}$  в пределах сжимаемой толщи находили из выражения

$$E_{np} = \frac{\sum h_i \sigma_i}{\sum (h_i \sigma_i / E_i)}, \quad (4)$$

где  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя грунта;

$E_i$  – модуль деформации данного слоя;

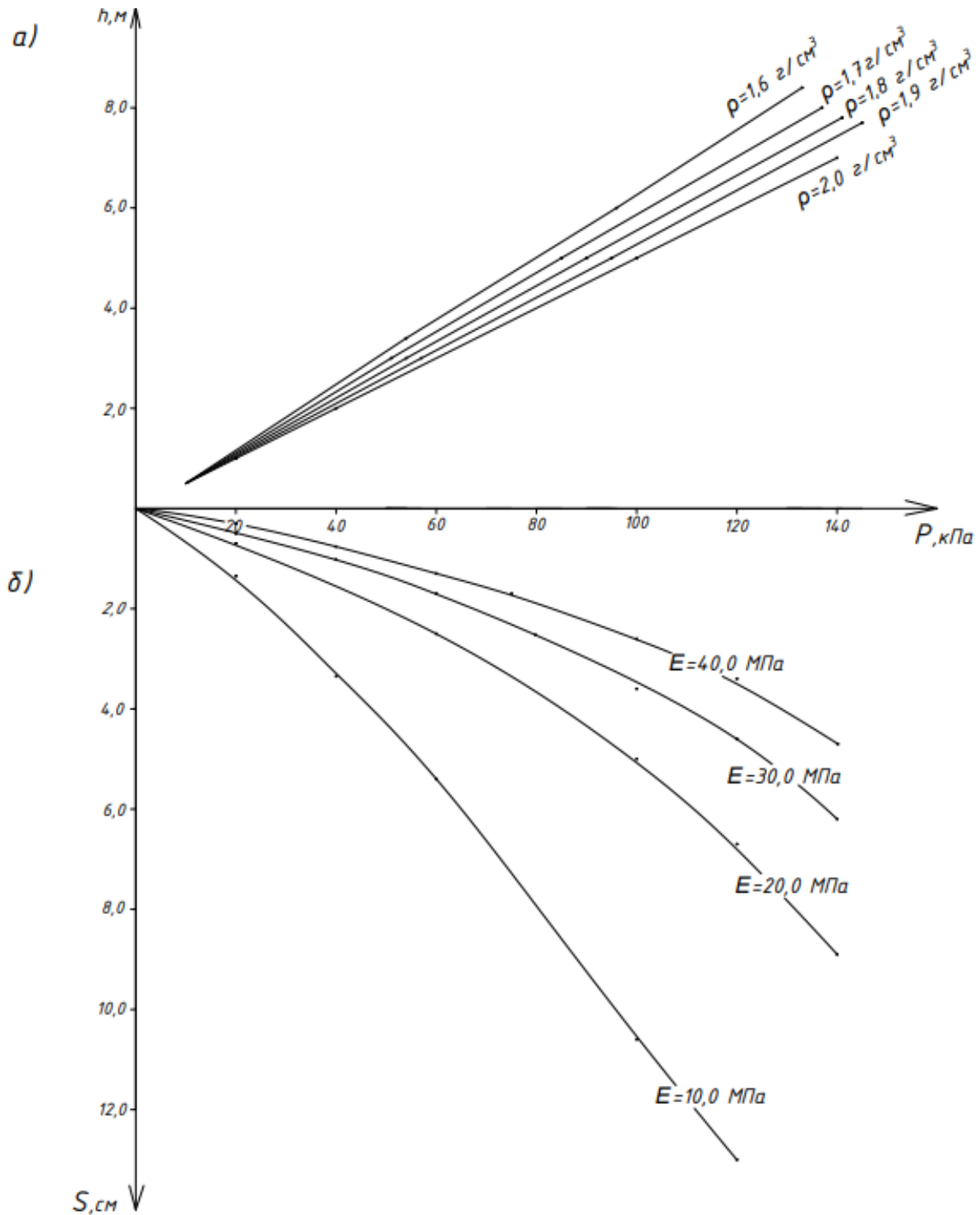
$\sigma_i$  – среднее значение нормальных напряжений для данного слоя.

Следует отметить, что с целью выполнения численного анализа  $E_{np}$  в расчетах принято 10,0; 20,0; 30,0 МПа. Расчеты осадки были выполнены при давлении на грунт основания 100 кПа; 200 кПа; 300 кПа. При этом мощность песчано-гравийной подушки принималась равной от 1,0 до 6,0 м при  $E = 10,0$ ; 20,0 и 30,0 МПа. Изменение плотности песчано-гравийной смеси принято от 1,6 т/м<sup>3</sup> до 2,0 т/м<sup>3</sup>. Зная толщину проектируемой подушки из ПГС и ее плотность, легко определить давление на основание (рисунок 1а). Учет деформаций основания от действия давления от песчано-гравийной подушки является важным, так как основание пригружено искусственным слоем значительной мощности.

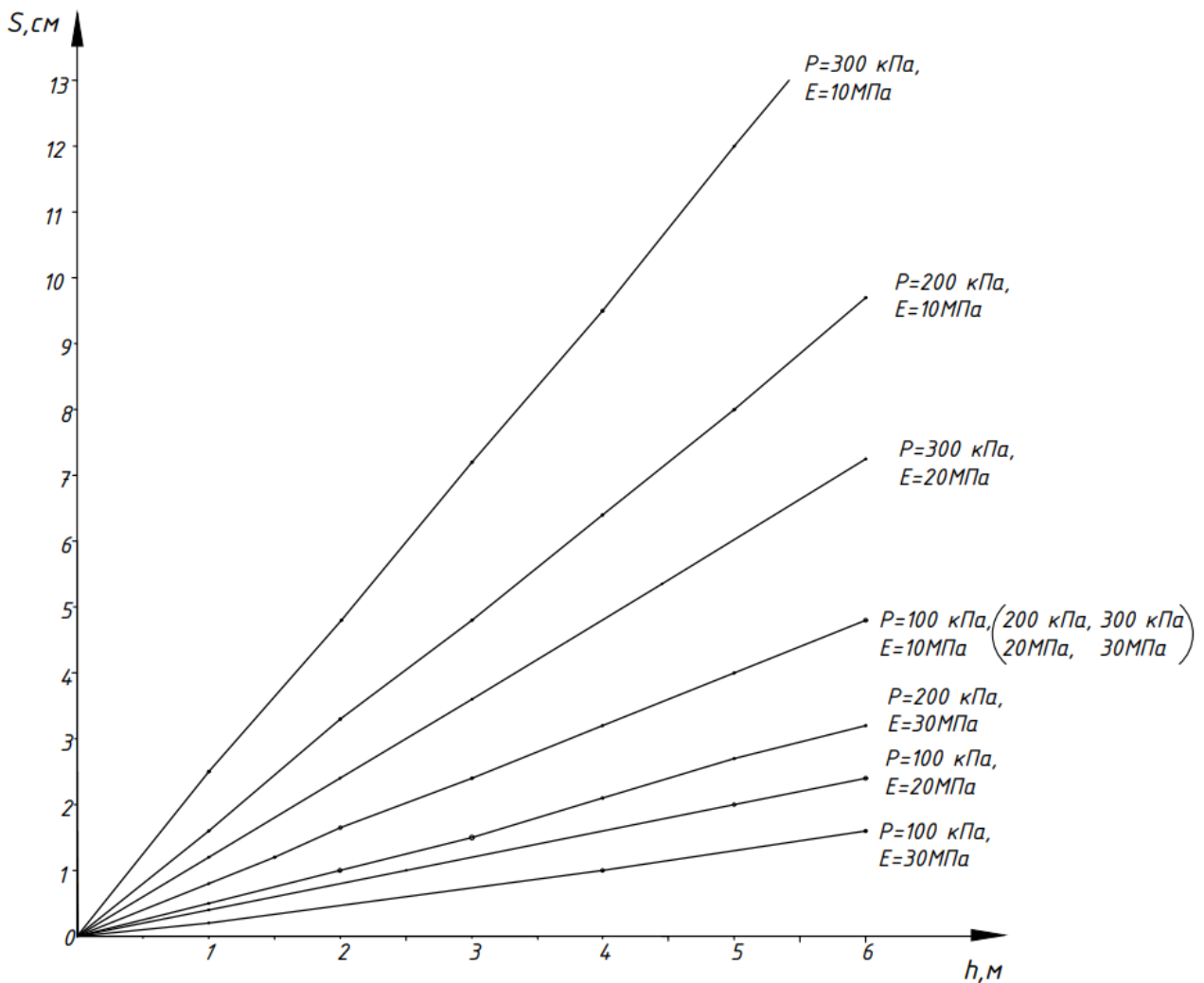
На рисунке 1б показаны графики зависимости  $S = f(P)$  при различных значениях модуля деформации основания. По графикам можно определить осадку основания от действия насыпи определенной плотности и мощности. К примеру, под фундаменты домов 9А и 9Б по ул. Грибоедова в г. Бресте выполнено искусственное основание из ПГС мощностью 3,4 м и плотностью 1,6 т/м<sup>3</sup>. По графикам (рисунок 1) находим, что давление выполненной подушки на основание составляет 54,0 кПа. Осадка основания при  $P = 54,0$  кПа и соответствующем значении  $E_{np}$  (к примеру 20,0 МПа) составляет 2,3 см. Если  $E_{np}$  имеет значение, отличное от значений, для которых построены графики, осадка принимается по интерполяции между соседними приведенными значениями. Осадку слоя песчано-гравийной смеси можно определить, пользуясь графиками, представленными на рисунке 2 либо по формуле

$$S = \beta \frac{Ph}{E_1}, \quad (5)$$

где  $\beta = 0,8$ , коэффициент, корректирующий упрощенную схему расчета;  
 $P$  – давление на грунт;  
 $h$  – мощность слоя песчаной подушки;  
 $E_1$  – модуль деформации подушки.



**Рисунок 1** – Влияние толщины песчано-гравийной подушки на величину давления (а) и осадки основания (б)



**Рисунок 2** – Осадки песчано-гравийной подушки различной мощности при давлении  $P = 100 \dots 300$  кПа и  $E = 10 \dots 30$  МПа

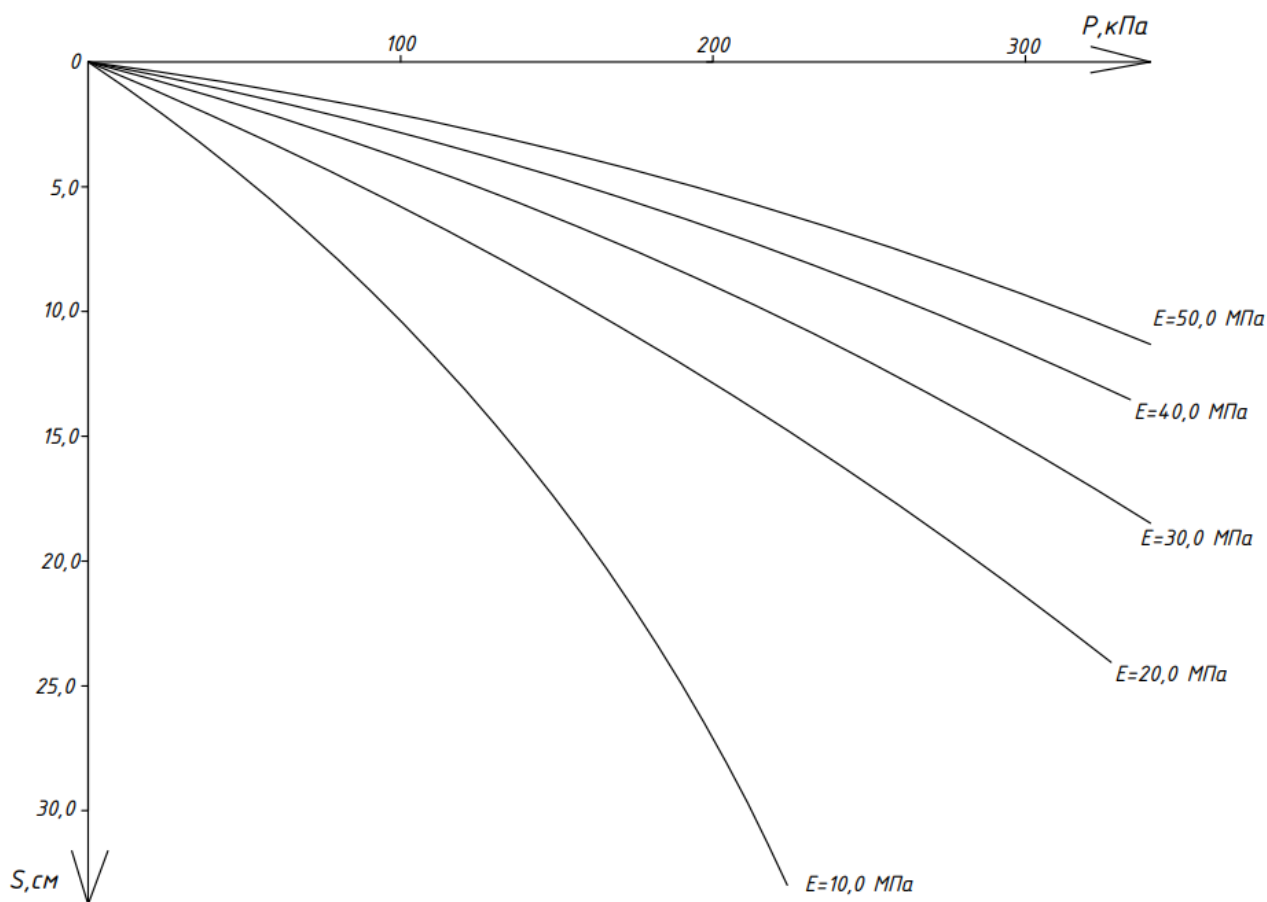
Видим, что осадка слоя ПГС при его мощности, равной 3,4 м, и давлении  $P = 54,0$  кПа, составляет 32,2 %. При увеличении плотности ПГС осадка основания также будет возрастать. Достоинством рассмотренных графиков является то, что осадку основания и осадку слоя песчано-гравийной смеси можно определить при различных значениях  $E$ , т. е. когда модуль деформации ПГС имеет одно значение, а модуль грунтов основания – другое, отличное от значений для ПГС.

Зависимость осадки от давления на грунт по подошве фундамента при различной деформируемости оснований показана на рисунке 3. Очевидно, что на величину осадки основания оказывает влияние давление от песчано-гравийной подушки. Пределы влияния этих давлений показаны на рисунке 1. Так, для искусственного основания мощностью 5 м при плотности его укладки  $2,0$  т/м<sup>3</sup> давление на грунт составляет 100 кПа. Осадка основания равна 5,2 см. Такая же осадка при принятых значениях  $P$  и  $E$  получена и от нагрузки от здания. Суммарная осадка равна 10,4 см, что превышает предельное значение для крупнопанельных зданий [1]. Таким образом, учет осадки от искусственного основания в суммарной осадке даже при сравнительно небольших изменениях мощно-

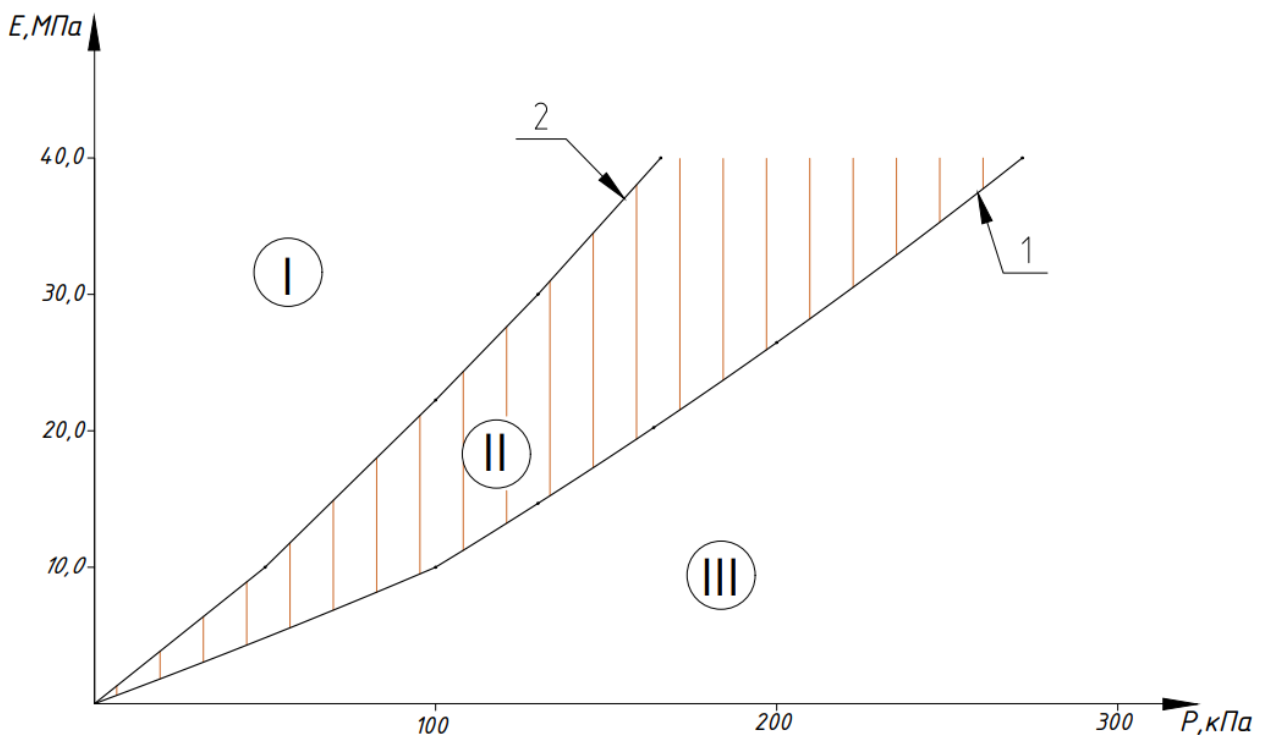
сти искусственного слоя весьма значительно влияет на общую осадку здания. На рисунке 4 показаны кривые предельных осадок, построенные без учета давления от песчано-гравийной подушки (кривая 1) и с ее учетом (кривая 2). Анализ полученных графиков показывает, что учет давления от ПГС резко увеличивает осадку здания.

Это важно учитывать при проектировании и строительстве зданий, особенно при изменении мощности искусственного слоя. Учет осадки от этого слоя поможет более точно предсказывать и контролировать осадку здания, что в свою очередь может снизить и даже исключить возможные повреждения и проблемы, связанные с осадкой, и особенно неравномерной [6].

При увеличении временного разрыва между окончанием возведения подушки и началом строительства здания величина суммарной осадки будет уменьшаться ввиду затухания осадки от давления ПГС. Пользуясь графиками (рисунки 1 и 3), можно определить суммарную осадку при любом значении  $P$  и  $E$ . На рисунке 4 выделим три зоны, различающиеся тем, что в зоне I в любой точке при соответствующих значениях  $P$  и  $E$  осадка будет всегда меньше предельной. В зоне II суммарные осадки зависят от мощности песчано-гравийной подушки и ее параметров. В зоне III влияние давления от песчано-гравийной подушки на осадку здания отсутствует.



**Рисунок 3** – Осадки оснований плитных фундаментов в зависимости от давления при различных значениях  $E$



1 – изменение предельной осадки без учета давления от песчано-гравийной смеси;  
 2 – изменение предельной осадки с учетом давления от песчано-гравийной смеси

**Рисунок 4** – Влияние модуля деформации и давления на характер изменения предельной осадки

Из рисунка 4 видно, что предельная величина осадки для крупнопанельного здания при наличии подушки из песчано-гравийной смеси мощностью 6,0 м при учете деформаций основания от подушки и от здания будет достигнута при  $P = 50,0$  кПа и  $E = 20,0$  МПа; без учета осадки от подушки – при  $P = 100,0$  кПа. Если суммарное давление от здания и подушки мощностью 6,0 м равно 100,0 кПа, то предельная осадка основания будет достигнута уже при  $E = 22,5$  МПа; без учета осадки от подушки – при  $P = 177,0$  кПа. При уменьшении толщины песчано-гравийной подушки при неизменном модуле деформации основания влияние суммарного давления на основание снижается. Таким образом, наличие песчано-гравийной подушки увеличивает общую осадку проектируемых зданий и чем больше ее мощность, тем суммарная осадка больше.

### Выводы

1. Наличие искусственного слоя грунта под подошвой фундамента и пригружающего естественное основание существенным образом влияет на величину общей осадки. Следовательно, необходим учет деформаций естественного слоя от действия пригрузки, образованной искусственным слоем.

2. Чем больше мощность и плотность искусственного слоя в верхней части сжимаемой толщи, тем больше величина суммарной осадки здания.

### Список использованных источников

1. Общие положения по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений : СП 5.01.01-2023 / Строительные правила Республики Беларусь. – Минск : Минстройархитектуры РБ, 2023. – 150 с.
2. Влияние отдельных факторов на величину осадки проектируемых фундаментов / П. С. Пойта, П. В. Шведовский, Д. И. Клебанюк, А. А. Четырбок // Вестник БрГТУ. – 2021. – № 2 (125). – С. 24–26.
3. Пойта, П. С. Оценка влияния глубины заложения и ширины подошвы фундамента на его осадку / П. С. Пойта, Т. П. Шалобыта, А. А. Четырбок // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сборник научных статей XXII Междунар. науч.-метод. семинара; Брест 29–30 сентября 2022 г. / БрГТУ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест: БрГТУ, 2022. – С. 157–166.
4. Грунты. Классификация : ГОСТ 25100-2020. – М. : Стандартинформ, 2020. – 38 с.
5. Руководство по проектированию фундаментных плит каркасных зданий. – М. : Стройиздат, 1978. – 128 с.
6. Фундаменты плитные : ТКП 45-5.01-67-2007 (02250) / Правила проектирования. – Минск : Минстройархитектуры, 2008. – 137 с.

УДК 624.15+624.139

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ОСАДОК ФУНДАМЕНТОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ

*П. С. Пойта<sup>1</sup>, Н. Н. Шалобыта<sup>2</sup>, Д. И. Клебанюк<sup>3</sup>, С. Н. Кандыбо<sup>4</sup>,  
П. В. Шведовский<sup>5</sup>*

*<sup>1</sup> Д. т. н., профессор, профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ppsbrest@mail.ru*

*<sup>2</sup> К. т. н., доцент, доцент кафедры геотехники и транспортных коммуникаций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: nnshalobyta@mail.ru*

*<sup>3</sup> Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры геотехники и транспортных коммуникаций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: klebanyuk.dmitri@yandex.ru*

*<sup>4</sup> К. т. н., доцент, заведующий кафедрой геотехники и транспортных коммуникаций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: svkandybo@yandex.com*

*<sup>5</sup> К. т. н., профессор, профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: ofig@bstu.by*

## Реферат

В работе приведены результаты экспериментальных исследований развития осадок фундаментов, находящегося в стадии завершения строительства, многофункционального торгового центра в г. Минске.

Наличие температурных и деформационных швов на парных колоннах 13-ти деформационных блоков обусловили выбор расположения осадочных марок и реперов, площадок приложения нагрузок и цикличность проведения работ по измерению осадок фундаментов. При этом учитывались ранее проведенные работы по измерению деформаций и состояние конструкций.

Полезная нагрузка прикладывалась постоянным нагружением трех площадок с интенсивностью 400–600 кг/м<sup>2</sup> на протяжении 72 дней, с последующей разгрузкой и измерением величин осадки до 80 дней.

Выявлена значительная неравномерность осадок по всем осям, что на наш взгляд обусловлено жесткостью каркаса перекрытия и сложными инженерно-геологическими условиями строительной площадки, при этом стабилизация осадки возможна только при её величине не более 1,1 мм, что соответствует максимальному значению равномерно-распределённой нагрузки 100 кг/м<sup>2</sup>.

Анализ расчетных и экспериментально наблюдаемых величин осадок и их неравномерности показал, что погрешность расчётных методов может быть значительной и превышать 40 % и более. Так же выявлено, что любое проявление динамических воздействий отрицательно влияет как на величину осадки фундаментов, так и ее неравномерность.

**Ключевые слова:** фундамент, нагрузки, геодезические наблюдения, марки, осадки, относительная неравномерность осадок.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF FOUNDATION SETTLEMENT DEVELOPMENT UNDER THE ACTION OF A PAYLOAD

*P. S. Poyta, N. N. Shalobyta, D. N. Klebanyuk, S. N. Kandybo, P. V. Shvedovsky*

### Abstract

The paper presents the results of experimental investigations of foundation settlement development of a multifunctional shopping centre in Minsk, which is under construction.

The presence of temperature and deformation joints on the paired columns of 13 deformation blocks determined the choice of the location of settlement marks and referents, load application sites and the cyclicity of foundation settlement measurements. Previous deformation measurements and the condition of the structures were taken into account.

The payload was applied by constant loading of the three sites with an intensity of 400–600 kg/m<sup>2</sup> for 72 days, followed by unloading and measurement of settlement values for up to 80 days.

Significant unevenness of settlement along all axes was revealed, which in our opinion is due to the rigidity of the slab frame and complex engineering and geological conditions of the construction site, while stabilisation of settlement is possible only when its value is not more than 1.1 mm, which corresponds to the maximum value of uniformly distributed load of 100 kg/m<sup>2</sup>.

The analysis of calculated and experimentally observed values of settlement and their non-uniformity has shown that the error of calculation methods can be significant and exceed 40 % and more. It is also revealed that any manifestation of dynamic effects negatively affects both the value of foundation settlement and its non-uniformity.

**Keywords:** foundations, loads, geodetic observations, grades, settlement, relative irregularity.

Разработка проекта фундаментов зданий и сооружений оптимальным образом удовлетворяющего, с одной стороны, условиям надёжности основания, а с другой – технологическим требованиям и индустриальности является достаточно трудной задачей. При этом одним из важнейших показателей, определяющим надёжную эксплуатацию любого здания, в течение всего срока службы, являются величины осадок, и в основном – неравномерные [1, 2].

Именно осадки являются критерием правильности и оптимальности принимаемых инженерных решений при проектировании оснований фундаментов зданий и сооружений.

Не меньшее значение в практике имеет и соответствие результатов расчета и данных экспериментальных наблюдений за развитием осадок фундаментов как строящихся, так и эксплуатируемых зданий и сооружений [3, 4].

С целью проверки этих положений нами были выполнены экспериментальные наблюдения за развитием осадок находящегося в стадии завершения строительства многофункционального торгового центра в г. Минске.

Предварительно до начала наблюдений были собраны сведения о состоянии конструкций, о ранее выполненных работах по измерению деформаций, намечено расположение осадочных марок и реперов, площадок приложения нагрузки и установлена цикличность по проведению работ измерения осадок фундаментов [5, 6].

Габаритные размеры здания 302,0 × 120,0 м. Высота в разных осях меняется, но не превышает 25,0 м. Здание торгового центра разделено на три функциональных блока, каждый из которых, в свою очередь, разделен на несколько температурных отсеков деформационными швами на парных колонах. В общей сложности здание разделено на 13 деформационных блоков. Одноэтажная прямоугольная часть здания длиной 109,0 м шириной 126,0 м выполнена в железобетонном каркасе. В качестве фундаментов под сборные железобетонные колонны запроектированы свайные фундаменты из выштампованных конусных свай длиной 4,0 м, объединенных поверху монолитным железобетонным ростверком [7].

Двухэтажная часть торгового центра в осях 15...23 и Б...Ф выполнена в монолитном каркасе как многопролетное здание, разделенное температурными швами между осями М – Н на два блока. Колонны первого этажа – монолитные, сечением от 400×400 мм до 1500×500 мм, с ячейкой 9,0×12,0 м и 12,0×18,0 м на втором этаже. В осях 24...41 и Б – Ф – здание разделено температурными швами на 7 блоков между осями 32–33, 37–38 и Д...Е, Р...С. Здесь колонны с сечением 400×400 и 500×500 мм, с ячейкой 9,0×12,0 м на первом этаже и с ячейками 12,0×18,0 м и 9,0×36,0 м – на втором этаже. Фундаменты свайные, из конусных свай в выштампованных скважинах, длиной 8,0 м, объединенных по верху монолитным ростверком.

Основание под полы по грунту в пределах всего пятна застройки запроектировано из отсыпанных грунтов путем устройства геомассива методом вибропогружения конических пуансонов с последующим заполнением скважин сухой цементно-песчаной смесью [7].

На рисунке 1 показаны площадки № 1...№ 3, в пределах которых прикладывали полезную нагрузку, а также схема установки осадочных марок.

При выборе схемы установки осадочных марок были учтены следующие особенности и соображения:

- в части здания (оси 15...25 и Б...Ф), в течение периода времени с ноября 2019 г. по январь 2021 г., были выполнены наблюдения за осадками фундаментов еще в период его строительства;
- по всем установленным маркам были получены существенные значения осадок фундаментов (от 52,9 мм до 116,7 мм). Значительно меньшие значения осадки имеют место в точках на пересечении осей Т/15 и Т/19;
- приращение осадки за период с 24.12.2019 от 22.01.21 (точка на пересечении осей И/19) при неизменной нагрузке (приостановка строительства) составило 68,9 мм или 59,0 % от полной;
- инженерно-геологические условия на данном участке представлены самыми мощными толщами торфа;
- места установки осадочных марок разделены деформационными швами.

Места площадок нагружения были выбраны таким образом, чтобы имелась возможность оценить взаимное влияние нагрузки на осадку фундаментов при наличии между ними температурных и деформационных швов. Расположение осадочных марок позволяло определить осадку фундаментов в центре приложенной нагрузки и в соседних по периметру точках. Кроме того, осадочные марки были размещены в точках, свободных от нагрузки (оси 16...18 и К...М, 20...22 и Р...У), что позволило фиксировать осадки в течение всего периода испытаний.

Полезную нагрузку прикладывали, нагружая постоянно три площадки (рисунок 2). После снятия первоначальных отсчетов на площадке № 1 была приложена нагрузка интенсивностью  $P = 400 \text{ кг/м}^2$ . На 14 день от начала испытаний после снятия отсчетов нагрузка была увеличена до  $600 \text{ кг/м}^2$ . Через месяц от начала испытаний была нагружена площадка № 2 нагрузкой  $P = 400 \text{ кг/м}^2$ .

Через 17 дней она была увеличена до  $600 \text{ кг/м}^2$ . На 61 день от начала испытаний была загружена площадка № 3 нагрузкой  $600 \text{ кг/м}^2$ . Через неделю все три площадки были разгружены. Однако измерение осадок фундаментов продолжили и после снятия всей нагрузки.

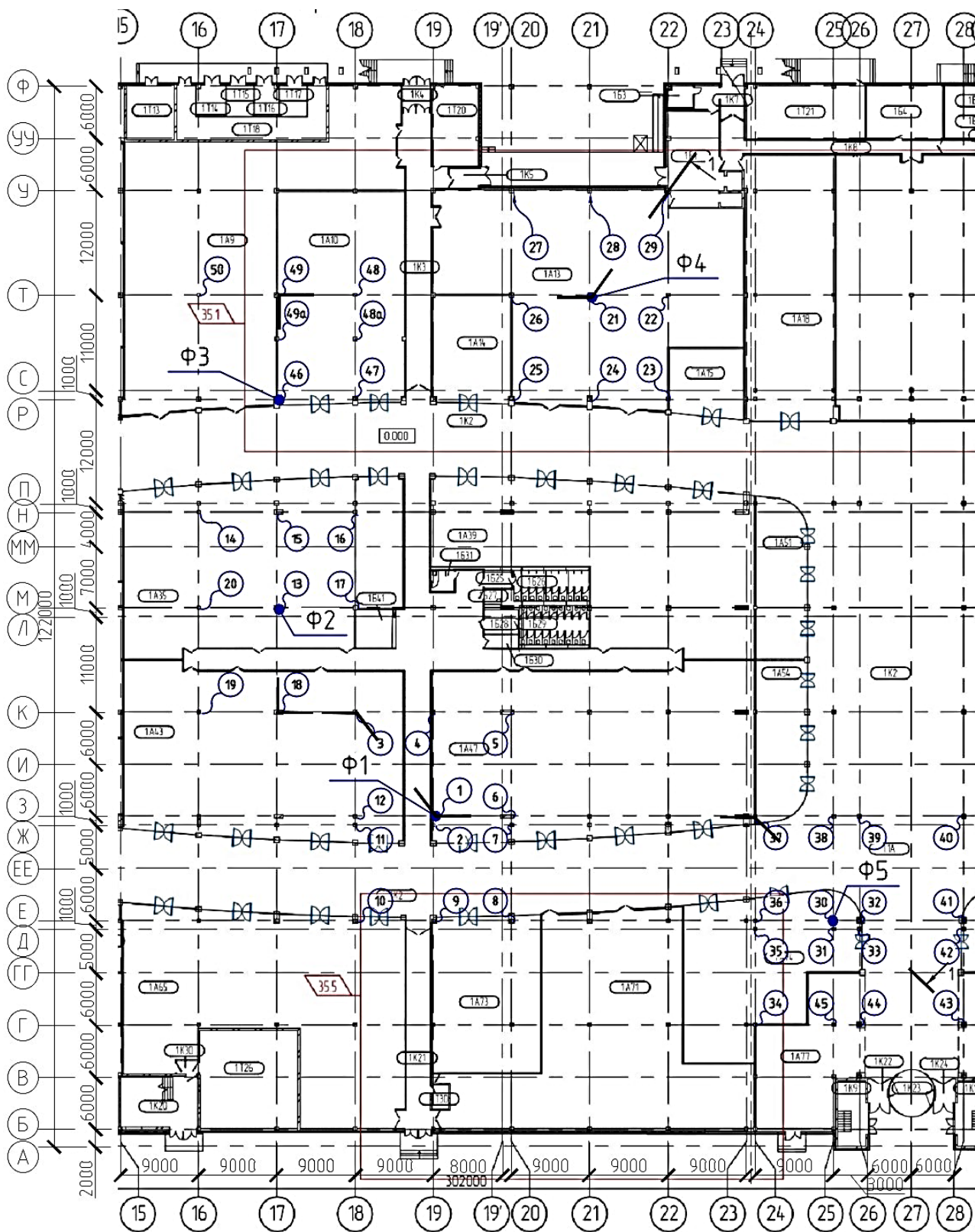
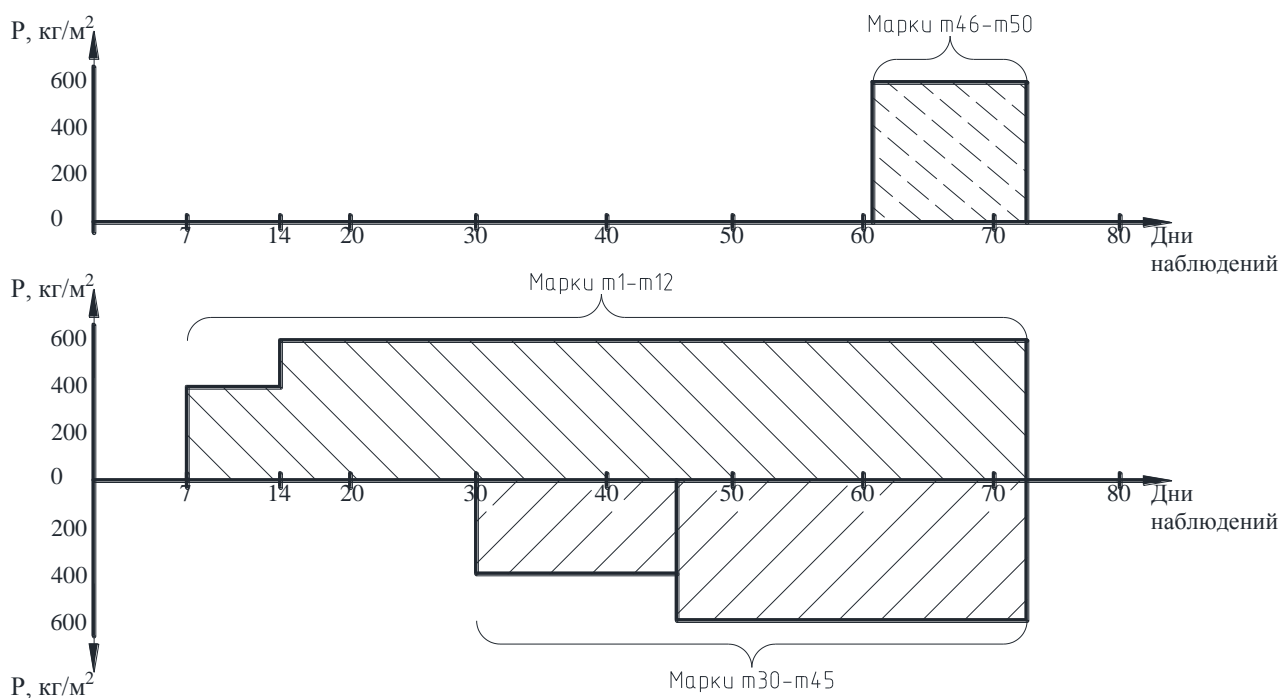
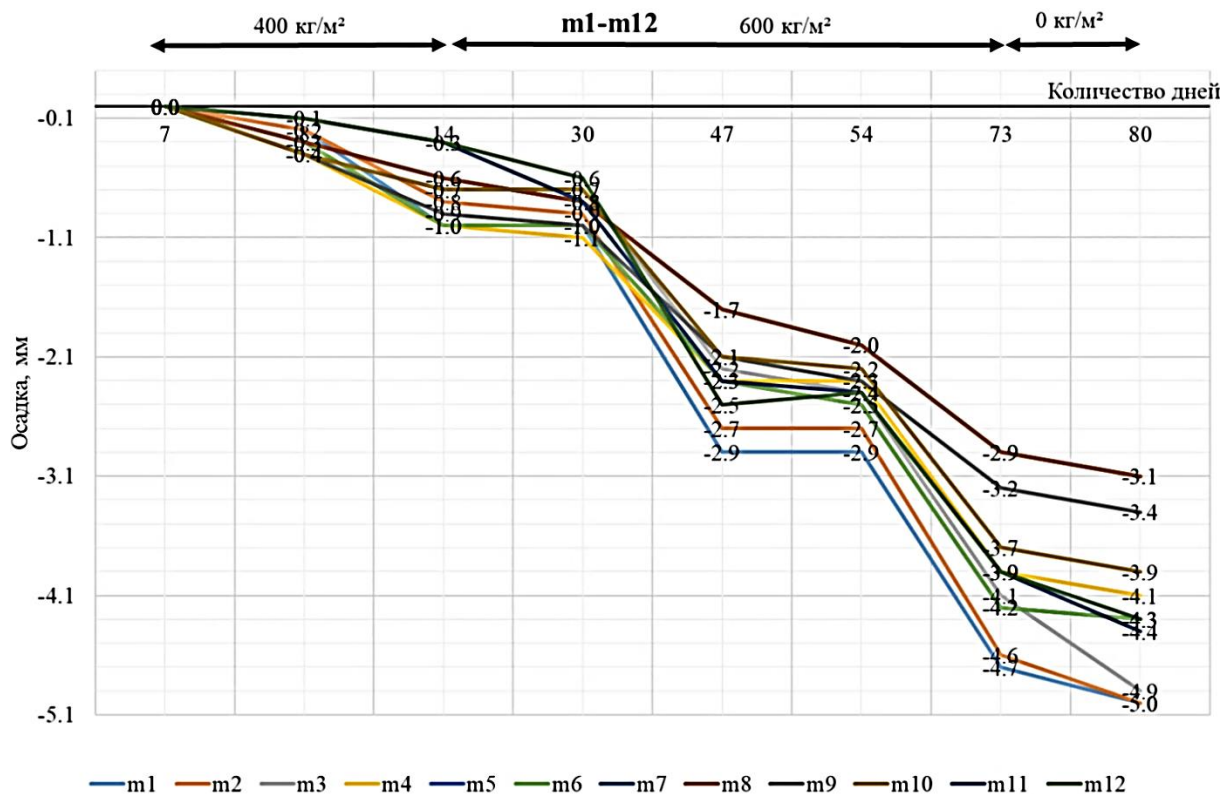


Рисунок 1 – План части здания с установленными деформационными марками



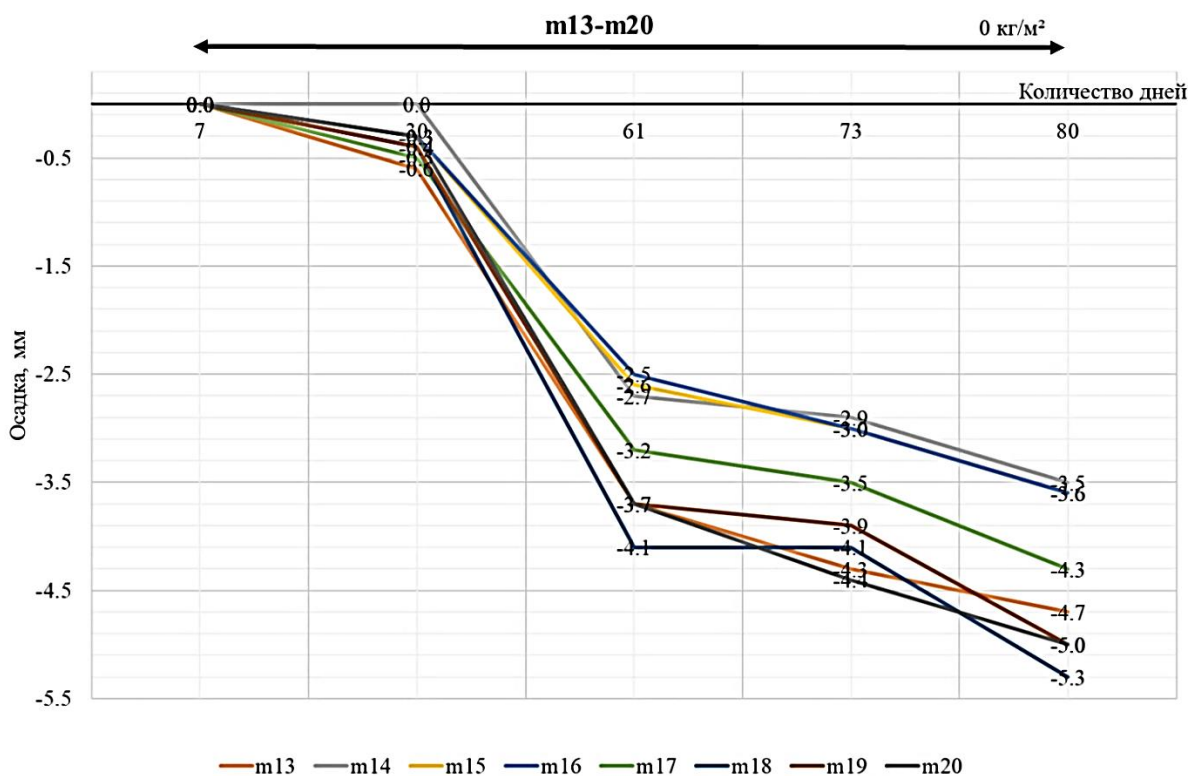
**Рисунок 2** – График воздействия временной нагрузки на перекрытие в зависимости от ее величины и продолжительности

Графики развития средних осадок фундаментов, расположенных в пределах площадки нагружения № 1, показаны на рисунке 3.



**Рисунок 3** – Изменение осадки фундаментов при их нагружении нагрузкой  $P = 400 \text{ кг/м}^2$  и  $P = 600 \text{ кг/м}^2$

Их анализ показывает, что при действии полезной нагрузки  $P = 400 \text{ кг/м}^2$  наибольшую осадку имеют фундаменты, находящиеся в центре загруженной площади ( $m_1; m_2$ ). При удалении от центра осадка уменьшается. Наиболее интенсивный рост осадки характерен в первые дни передачи нагрузки на фундаменты. Через неделю с момента приложения нагрузки рост осадки замедляется. Следующие две недели рост осадки составляет не более  $0,01 \text{ мм/день}$ , несмотря на увеличение нагрузки до  $600 \text{ кг/м}^2$ . Однако нагрузка площадки № 2 нагрузкой  $400 \text{ кг/м}^2$  существенно отражается на развитии осадок марок  $m_1 \dots m_{12}$ , несмотря на то, что площадка № 2 находится на удалении более  $27,0 \text{ м}$  от площадки № 1. Более того, площадки № 1 и № 2 разделяют два деформационных шва (оси 19–20; 23–24). Рост осадки составил более  $3,0 \text{ мм}$ . Скорость осадки на этом участке составила  $0,16 \text{ мм/день}$ , т. е. она возросла более чем в 16 раз. Увеличение нагрузки до  $600 \text{ кг/м}^2$  уже не оказывает существенного влияния на рост осадки, т. е. опять происходит уменьшение её скорости, хотя в меньшей степени. Аналогичная картина развития осадок фундаментов в пределах площадки № 1 характерна и при загрузке площадки № 3 нагрузкой  $P = 600 \text{ кг/м}^2$ . Однако на этом участке тенденция к уменьшению скорости деформации меньше, чем при предыдущих загрузках. Следует обратить внимание на то, что площадки № 1 и № 3 разделяют деформационные и температурные швы. Таким образом очевидно, что максимальные осадки вызывает нагрузка  $400 \text{ кг/м}^2$ . Её дальнейшее увеличение эффекта увеличения роста осадки не вызывает. Это означает, что полезная нагрузка, допускаемая на перекрытия, должна быть менее  $400 \text{ кг/м}^2$ . С другой стороны, очевидно большое влияние нагрузки, приложенной на соседних площадках, хотя и весьма удалённых. Данный факт подтверждается развитием осадки фундаментов, на которых нагрузка не прикладывалась (рисунок 4).



**Рисунок 4** – Развитие осадки фундаментов на площадке вне площади загрузки

Графики осадок фундаментов (марки  $m_{13}...m_{20}$ ) в значительной степени дублируют изменение осадок фундаментов на площадке № 1. Максимальная осадка здесь больше, чем у фундаментов в центре загруженной площадки. Деформационные швы предусмотренную при проектировании им функцию не выполняют. Передачу усилий на колонны и их фундаменты от загрузки удалённых площадок можно объяснить жесткостью каркаса перекрытия и инженерно-геологическими условиями. Следовательно, при приложении полезной нагрузки на перекрытия она не должна превышать  $100...150 \text{ кг/м}^2$  при ее сплошном расположении. Это подтверждается выполненными расчетами осадок фундаментов в соответствии с требованиями [9...11]. Полученные результаты показывают, что осадка фундамента (оси И/19) при полезной нагрузке  $P = 100 \text{ кг/м}^2$  с учетом влияния соседних фундаментов составляет 1,2 мм. При увеличении полезной нагрузки до  $300 \text{ кг/м}^2$  осадка составляет 0,39 мм.

Сравнительный анализ расчетных и экспериментально наблюдаемых величин осадок и их неравномерности показал, что погрешность может быть значительной и превышать 40 % и более.

Анализ графиков осадки при различных давлениях показывает, что ее стабилизация возможна, когда осадка не превышает 1,1 мм. Принимая эту величину осадки как соответствующую нормальной эксплуатации блока здания в осях 14..28, максимальную равномерно-распределительную нагрузку следует принимать не более  $100..150 \text{ кг/м}^2$ .

Следует также отметить, что любое проявление динамических воздействий негативно повлияет как на величину осадки фундаментов, так и ее неравномерность.

### **Выводы**

Анализ расчётных и экспериментально наблюдаемых величин осадок и их неравномерности показал, что погрешность может быть значительной и превышать 40 % и более.

Так же установлено, что жесткость каркаса здания влияет на развитие осадок фундаментов вне загруженных площадок, удаленных на 30–40 м от мест действия нагрузки.

Стабилизация осадки от действия полезной нагрузки возможна при ее величине не более 1.1 мм, что соответствует максимальному значению равномерно-распределенной нагрузки  $P = 100 \text{ кг/м}^2$ .

### **Список использованных источников**

1. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общей ред. В. А. Ильичева, Р. А. Мангушева. – М. : Изд.-во АСВ, 2014. – 728 с.
2. Механика грунтов, основания и фундаменты : учебное пособие для строит. спец. вузов / С. Б. Ухов, В. В Семенов, В. В. Знаменский [и др.] ; под ред. С. Б. Ухова. – 3-е изд., испр. – М. : Высшая школа, 2004. – 566 с.
3. Multi-storeyed building slab foundation settlement / P. S. Poita, N. N. Shalobyta, T. P. Shalobyta, E. N. Shalobyta // Vestnik of Brest State Technical University. – 2023. – № 3 (132). – P. 11–14.

4. Шашкин, А. Г. Проектирование зданий и подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга / А. Г. Шашкин. – М. : Академическая наука – Геомаркетинг, 2014. – 352 с.
5. Строительные нормы Республики Беларусь. Инженерные изыскания для строительства : СН 1.02.01-2019. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 113 с.
6. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений. – М. : Стройиздат, 1975. – 156 с.
7. Программа проведения испытаний оснований фундаментов участка здания, расположенного по адресу: г. Минск, ул. Казимировская, 12 в осях 15...28. – Брест. – 21 с.
8. Письмо № 20 от 22.03.2021г. Объект «Спортивно-оздоровительный и торгово-развлекательный центр на пересечении ул. Казимировской – ул. Каменногорской в г. Минске». – Минск, 2021. – 12 с.
9. Строительные правила Республики Беларусь. Общие положения проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений : СП 5.01.01-2023. – Минск : Минстройархитектуры, 2023. – 143 с.
10. Морарескул, Н. Н. Основание и фундаменты в торфяных грунтах : учебное пособие / Н. Н. Морарескул. – СПб. : Петербургский гос. университет путей сообщения, 1999. – 49 с.
11. Проектирование фундаментов зданий и подземных сооружений / под ред. Б. И. Долматова. – М. : Изд. АСВ ; СПб., СПбГАСУ, 2006. – 428 с.

УДК 691:035.267

## **ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОЛОКОН**

*С. А. Романовский<sup>1</sup>, А. А. Бакатович<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> Старший преподаватель кафедры строительного производства,  
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
Новополоцк, Беларусь, e-mail: s.romanovskiy@psu.by*

*<sup>2</sup> К. т. н., доцент, декан инженерно-строительного факультета,  
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
Новополоцк, Беларусь, e-mail: a.bakatovich@psu.by*

### **Реферат**

Приведены результаты комплексных исследований теплоизоляционных плит, содержащих в качестве волокнистого структурообразующего материала льняные очесы. Представлены сведения о составе и соотношении компонентов утеплителя на основе очесов льна. Установлены показатели сорбционной влажности при относительной влажности воздуха 40–97 % и коэффициенты паропроницаемости теплоизоляционного материала из льняных очесов. На основании натуральных испытаний подтверждена эффективность теплоизоляционных плит из очесов льна в качестве тепловой изоляции для ограждающих конструкций жилых домов.

**Ключевые слова:** очесы льна, теплоизоляционные плиты, состав, физические показатели.

## **Введение**

Рациональное использование вторичного сырья растительного или сельскохозяйственного происхождения принадлежит к актуальным вопросам современного этапа развития науки. Эффективным решением поставленной задачи является использование растительных волокон в качестве структурообразующего материала утеплителей в комплексе с экологически безопасными вяжущими. К ограничивающим факторам применения теплоизоляционных плит из растительного сырья в Беларуси и России относятся высокая стоимость, горючесть и отсутствие жесткости при малой средней плотности. Однако проводимые исследования по разработке тепловой изоляции с применением растительных волокон подтверждают востребованность данного направления.

Наибольшее распространение в качестве структурообразующего материала теплоизоляционных плит на основе сырья растительного происхождения получили древесные волокна. Связующими компонентами могут выступать поливинилацетатный клей [1], смола [2], парафин [3] и синтетические волокна [4]. Тепловая изоляция из волокон древесины имеют следующие физико-механические характеристики: средняя плотность – 30–270 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности – 0,038–0,059 Вт/(м·°С), прочность на сжатие при 10 % деформации – 0,01–0,15 МПа.

В настоящее время особое внимание уделяется исследованиям по рациональному использованию вторичного сырья сельскохозяйственных культур. Данные о составах, средней плотности и коэффициентах теплопроводности наиболее известных теплоизоляционных плит из волокон сельскохозяйственного сырья представлены в таблице 1.

Приведенные физико-механические показатели (таблица 1) тепловой изоляции на основе вторичного сырья сельскохозяйственных культур подтверждают эффективность утеплителей на основе структурообразующих материалов волокнистой структуры. Однако поиск максимально эффективного структурообразующего материала из вторичных волокон сельскохозяйственных культур для теплоизоляционных материалов остается весьма актуальной и важной задачей.

## **Основная часть**

Основная задача исследований заключалась в получении экологически безопасных утеплителей с высокими теплофизическими характеристиками, обеспечивающими экологическую безопасность для человека и окружающей среды.

### *Компоненты образцов теплоизоляционных плит*

Льняные очесы длиной от 5 до 10 см использовали в качестве структурообразующего материала для изготовления образцов тепловой изоляции. Для проведения сравнительных испытаний получали образцы утеплителя из волокон льна. Жидкое натриевое стекло, модифицированное двухкомпонентной добавкой извести и гипса, применяли в виде вяжущего компонента.

**Таблица 1** – Состав, средняя плотность и коэффициент теплопроводности тепловой изоляции на основе вторичных волокон сельскохозяйственного сырья

№	Структурообразующий материал	Связующее	Добавки	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Ссылка
1	Льняное волокно	полиэфирное волокно	–	32–34	0,04	[5]
2	Льняное волокно	крахмал	соли бора	32–34	0,038–0,04	[6]
3	Конопляное волокно	полиэстр	сода	35–40	0,038–0,04	[7]
4	Волокно хлопка	жидкое стекло	–	40–100	0,037–0,041	[8]
5	Волокно хлопка	–	–	150–450	0,059–0,082	[9]
6	Волокно коры масличной пальмы	жидкое стекло	–	135–168	0,046–0,047	[10]
7	Кокосовые волокна	–	–	30–115	0,058–0,097	[11]
8	Джутовые волокна	жидкое стекло	–	60–100	0,037–0,049	[12]

#### *Основные свойства тепловой изоляции*

Оценка результатов исследования коэффициентов теплопроводности утеплителей на основе льняных очесов и волокон свидетельствует о том, что при варьировании средней плотности от 60 до 100 кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности образцов изменяется в пределах 0,035–0,045 Вт/(м·°С). При этом, значения коэффициентов теплопроводности образцов из очесов льна в среднем на 16 % ниже показателей образцов на основе волокон льна. Также стоит отметить, что минимальные значения 0,035 Вт/(м·°С) и 0,042 Вт/(м·°С) у образцов из очесов льна и льняных волокон определены при средней плотности 80 кг/м<sup>3</sup>.

Анализ полученных данных о прочности на сжатие при 10 % деформации позволил выявить, что при плотности 60 кг/м<sup>3</sup> показатели прочности образцов на основе очесов и волокон льна составляют 0,17·10<sup>-2</sup> МПа и 0,26·10<sup>-2</sup> МПа соответственно. Повышение средней плотности образцов до 100 кг/м<sup>3</sup> приводит к увеличению прочности на сжатие при 10 % деформации в 1,8 и 1,6 раза. Замена льняных волокон на очесы льна в исследуемом диапазоне средней плотности снижает значения прочности в среднем на 29–35 %.

#### *Количественный состав теплоизоляционных материалов*

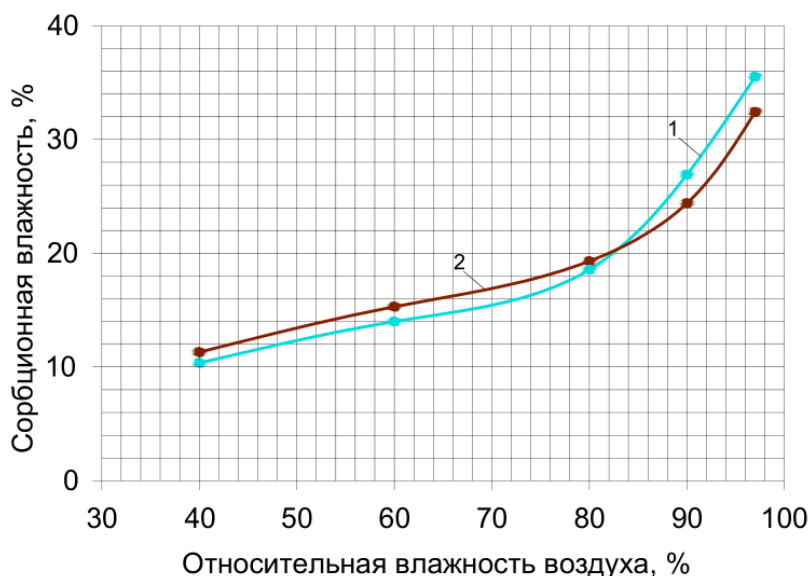
По результатам проведенных исследований коэффициента теплопроводности и прочности на сжатие при 10 % деформации установлен и приведен в таблице 2 необходимый количественный состав тепловой изоляции, обеспечивающий высокие теплофизические характеристики утеплителей из очесов и волокон льна.

**Таблица 2** – Количественный состав и плотность теплоизоляционных плит

Расход компонентов на 1 м <sup>3</sup> , кг				Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>
структурообразующий материал	вяжущее			
льняные очесы или волокна	жидкое стекло	известь	гипс	
52–92	4,5–12,5	0,2–0,8	0,2–0,8	60–100

*Сорбционная влажность теплоизоляционных плит*

Значения сорбционной влажности утеплителей на основе льняных очесов и волокон определяли на образцах, отобранных из теплоизоляционных материалов со средней плотностью 70 кг/м<sup>3</sup>. Теплоизоляционные плиты имели следующий расход компонентов на 1 м<sup>3</sup>: структурообразующий материал – 60 кг/м<sup>3</sup>, натриевое жидкое стекло – 9 кг/м<sup>3</sup>, гипс – 0,5 кг/м<sup>3</sup> и известь – 0,5 кг/м<sup>3</sup>. Изотермы сорбции водяного пара образцами тепловой изоляции, полученные по результатам проведенного эксперимента, представлены на рисунке 1.



Составы на основе: 1 – очесов льна; 2 – волокон льна

**Рисунок 1** – Изотермы сорбции водяного пара материалами

На основании полученных данных (рисунок 1) установлено, что при относительной влажности воздуха 40 % и 60 % сорбционная влажность образцов на основе очесов льна составляет 10,2 % и 14 % соответственно, что на 9 % ниже показателей образцов из льняных волокон. Сорбционная влажность образцов на структурообразующем материале из очесов при влажности воздуха 80 % равна 18,2 %, что практически совпадает с величиной образцов на основе волокон льна. Влажность воздуха 90 % способствует возрастанию сорбционной влажности образцов из очесов льна до 27 %, что выше значения образцов на основе льняных волокон на 12 %. Поглощение водяных паров образцами, содержащими очесы льна, при относительной влажности воздуха 97 % составляет 37,6 %, что на 15 % выше величины сорбции водяных паров образцами из волокон льна.

Большие показатели сорбционной влажности у образцов на основе льняных очесов относительно образцов из волокон льна при относительной влажности воздуха от 90 до 97 % объясняются тем, что разделённые элементарные волокна в очесах имеют большую геометрическую площадь контакта поверхности с внешней средой относительно показателей волокон льна, состоящих из плотных пучков плотно прилегающих друг к другу элементарных волокон.

*Влияние показателя влажности на теплопроводность утеплителей*

Исследования проводили на образцах со средней плотностью 70 кг/м<sup>3</sup>. Масса образцов в сухом состоянии составляла 219 г. Коэффициент теплопроводности образцов из очесов и волокон льна равен 0,035 Вт/(м·°С) и 0,041 Вт/(м·°С) соответственно. Результаты исследований приведены в таблице 3.

Из экспериментальных данных (таблица 3) следует, что через двое суток показатель влажности образцов 1 из очесов льна достигает 9,3 % и практически идентично значению образцов 5 на основе льняных волокон. Для образцов 2, содержащих очесы льна, через 120 часов после начала испытаний показатель влажности повышается до 23,2 %, что на 12 % больше значения образцов 6 из волокон льна. В течение следующих 5 суток величина влажности образцов 3, изготовленных на основе очесов, увеличивается до 32,4 %, что превышает значение образцов 7 из льняных волокон на 19 %. По сравнению с показателями сухих материалов, после 20 суток испытания, содержание влажности в образцах 4 и 8 увеличилось до 36,9 % и 32,1 %.

Основываясь на полученных результатах (таблица 3) установлено, что прирост коэффициента теплопроводности образцов 1 и 5, содержащих очесы и волокна льна, после 48 часов испытаний составил и 23 % и 17 % соответственно. После пяти суток выдерживания плит в герметичной камере коэффициент теплопроводности образцов 2 и 6 из льняных очесов и волокон увеличился на 66 % и 43 %. Изменение коэффициента теплопроводности образцов 3 за вторые 120 часов составляет 16 %, а для образцов 7–20 %. Коэффициент теплопроводности образцов 4 и 8 на основе очесов и волокон льна после 20 суток испытания повысился в 1,9–2,1 раза относительно показателей сухих материалов, при этом значение образцов 8 превышает показатель образцов 4 на 7 %.

С использованием полученных зависимостей изменения коэффициентов теплопроводности от показателя влажности (таблица 3) определено, что зависимость коэффициента теплопроводности от влажности для экспериментальных теплоизоляционных материалов из волокон растительного происхождения достаточно точно аппроксимируется полиномиальной функцией вида  $K = a \cdot W + b$ . Коэффициент корреляции уравнения для плит на основе очесов льна равен  $R^2 = 0,993$ ; для образцов из волокон льна  $R^2 = 0,974$ .

Зависимости коэффициента теплопроводности от изменения показателя влажности рассматриваемых теплоизоляционных плит можно представить в виде выражений 1 и 2:

$$\lambda_w = \lambda_0 \cdot (0,0302 \cdot W + 0,9721); \quad (1)$$

$$\lambda_w = \lambda_0 \cdot (0,0292 \cdot W + 0,9532), \quad (2)$$

где  $\lambda_w$  – коэффициент теплопроводности утеплителя при данной влажности, Вт/(м·°С);  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности сухого теплоизоляционного материала, Вт/(м·°С);  $W$  – влажность плит, %.

**Таблица 3** – Показатели массы, плотности, влажности и коэффициента теплопроводности образцов теплоизоляционных плит во влажном состоянии

№ партии образцов	Время выдерживания образцов в камере, сутки (часы)	Показатели образцов				
		масса, г	средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	влажность, %	коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	изменение коэффициента теплопроводности
теплоизоляционные плиты из льняных очесов						
1	2 (48)	239,4	76,6	9,3	0,043	1,23
2	5 (120)	269,8	86,3	23,2	0,058	1,66
3	10 (240)	290	92,8	32,4	0,067	1,91
4	20 (480)	299,8	95,8	36,9	0,075	2,14
теплоизоляционные плиты из волокон льна						
5	2 (48)	238,9	76,4	9,1	0,049	1,2
6	5 (120)	264,3	84,5	20,7	0,06	1,46
7	10 (240)	278,6	89,1	27,2	0,072	1,76
8	20 (480)	289,4	92,5	32,1	0,08	1,95

При аппроксимации полученных данных выведена эмпирическая зависимость коэффициента теплопроводности экспериментальных утеплителей от показателя влажности общего вида:

$$\lambda_w = \lambda_0 \cdot (a \cdot W + b), \quad (3)$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности сухого материала, Вт/(м·°С);  $W$  – влажность материала, %;  $a$ ,  $b$  – эмпирические коэффициенты (для материала на основе очесов льна и модифицированного жидкого стекла  $a = 0,0302$ ,  $b = 0,9721$ ; для материала из волокон льна и модифицированного жидкого стекла  $a = 0,0292$ ,  $b = 0,9532$ ).

#### *Коэффициент паропроницаемости*

Для определения коэффициента паропроницаемости изготавливали образцы средней плотностью от 60 до 100 кг/м<sup>3</sup>. В таблице 4 представлен количественный состав, средняя плотность и коэффициенты паропроницаемости исследуемых теплоизоляционных материалов.

Согласно данным таблицы 4, образцы тепловой изоляции на основе очесов льна средней плотностью от 60 до 100 кг/м<sup>3</sup> обеспечивают коэффициент паропроницаемости в пределах 0,36–0,39 мг/(м·ч·Па). При указанном диапазоне средних плотностей образцы теплоизоляционных плит из льняных волокон имеют показатели паропроницаемости, равные 0,4–0,42 мг/(м·ч·Па). Сравнительный анализ значений паропроницаемости образцов на основе

волокон сельскохозяйственного происхождения показал, что коэффициенты паропроницаемости теплоизоляционных материалов, содержащих льняные очесы, на 5–10 % ниже значений тепловой изоляции из льняных волокон.

**Таблица 4** – Количественный состав, средняя плотность и коэффициенты паропроницаемости исследуемых образцов

№ образца	Расход компонентов на 1 м <sup>3</sup> , кг					Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент паропроницаемости, мг/м·ч·Па
	очесы льна	волокна льна	жидкое стекло	гипс	известь		
2	50	–	9	0,5	0,5	60	0,39
4	–	50	9	0,5	0,5	60	0,42
6	70	–	9	0,5	0,5	80	0,38
8	–	70	9	0,5	0,5	80	0,41
10	90	–	9	0,5	0,5	100	0,36
12	–	90	9	0,5	0,5	100	0,4

*Теплофизические показатели теплоизоляционных материалов из очесов и волокон льна в условиях эксплуатации зданий*

В осенне-весенний периоды 2017–2025 годов выполнялись наблюдения за теплофизическими процессами, происходящими в ограждающих конструкциях одноэтажного жилого дома, содержащими в качестве тепловой изоляции исследуемые теплоизоляционные плиты на основе льняных волокон и очесов. Средняя плотность образцов для конструкции чердачного перекрытия соответствовала 70 кг/м<sup>3</sup>. В наружных ограждающих конструкциях стен домов с вентилируемой системой утепления и с деревянной каркасной системой использовали теплоизоляционные материалы со средней плотностью 100 кг/м<sup>3</sup>.

По результатам проведенных натурных испытаний выявлено, что при температуре воздуха в объеме чердачного пространства –17 °С показатель термического сопротивления теплопередаче чердачного перекрытия с теплоизоляционными плитами на основе очесов льна составляет 6,27 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт, что на 13 % превышает значение конструкции перекрытия с материалами из льняных волокон. Стеновое ограждение с устройством вентилируемой системы утепления, включающее тепловую изоляцию на основе очесов льна, при температуре наружного воздуха –23 °С обеспечивает термическое сопротивление теплопередаче 3,24 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт, что выше показателя ограждающей конструкции с утеплителями из льняных волокон на 11 %. Сопротивление теплопередаче стены дома с деревянной каркасной системой, содержащей в качестве утепления теплоизоляционные материалы на основе очесов, при минимальной температуре наружного воздуха –22 °С на 17 % превышает значение ограждающей конструкции с плитами из волокон льна, равное 3,78 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт. Полученные показатели указывают на обеспечение экспериментальными материалами высоких теплоизолирующих свойств в зимний период.

## **Заключение**

На основании исследований установлено, что при средней плотности 60–100 кг/м<sup>3</sup> тепловая изоляция на основе очесов льна имеет следующие физико-механические характеристики: коэффициент теплопроводности – 0,035–0,04 Вт/(м·°С), прочность на сжатие при 10 % деформации – 0,17–0,31·10<sup>-2</sup> МПа, коэффициент паропроницаемости – 0,36–0,39 мг/(м·ч·Па).

При относительной влажности воздуха 60–80 % сорбционная влажность тепловой изоляции на основе очесов составляет 14–19 %, что является достаточно низким показателем для материалов из растительного сырья.

Изменение показателя влажности оказывает существенное влияние на среднюю плотность и коэффициент теплопроводности теплоизоляционных плит на основе очесов и волокон льна. Увеличение влажности теплоизоляционных материалов приводит к повышению плотности на 32–37 % и коэффициента теплопроводности в 1,9–2,1 раза. На основании полученных данных выведена эмпирическая зависимость коэффициента теплопроводности утеплителей из льняных очесов и волокон от показателя влажности общего вида, позволяющая прогнозировать значения коэффициента теплопроводности с учётом влажности материала.

Полученные результаты натурных испытаний ограждающих конструкций в условиях эксплуатации зданий свидетельствуют о том, что при минимальных значениях наружного воздуха конструкции, включающие теплоизоляционные плиты из очесов льна, имеют значения сопротивления теплопередаче, равные 3,24–6,27 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт, что превышает показатели стеновых конструкций и чердачного перекрытия с теплоизоляционными материалами на основе льняных волокон на 11–17 %. Проведённые испытания подтверждают возможность применения теплоизоляционных плит из очесов льна как эффективного утеплителя для ограждающих конструкций жилых домов.

## **Список использованных источников**

1. Патент России № 2556596. Сырьевая смесь для получения теплоизоляционного материала // Оpubл. в бюлл. Изобр. – 2015. – № 19.
2. Толстик, Ю. В. Теплоизоляционные древесноволокнистые плиты: сравнительный анализ основных свойств и перспективы развития / Ю. В. Толстик, И. К. Божелко, А. А. Титунин // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Кострома, 8–11 сентября 2021 г. – Кострома : Костромской государственной университет, 2021. – С. 95–97.
3. Бакатович, А. А. Теплоизоляционный материал на заполнителе из отходов переработки хлопкового волокна / А. А. Бакатович, Н. В. Давыденко, М. А. Розыев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 8. – С. 29–33.
4. Thermal insulating materials made up of poplar wood fibres / P. Vignon, M. Hobballah, H. Tran [et al.] // 2nd Conference on Engineered Wood Products based on Poplar/willow Wood. León, Spain / September 8th-10th 2016. – 2016. – P. 37–50.
5. Плиты теплоизоляционные звукопоглощающие. Технические условия ТУ ВУ 391129716.001-2015. – Введ. 27.07.2015. – Ореховск, 2015. – 10 с.

6. Советников, Д. О. Оптимальная толщина утеплителя наружной стены для создания энергоэффективного и экологичного здания в условиях Санкт-Петербурга / Д. О. Советников, Д. О. Семашкина, Д. В. Баранова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 12 (51). – С. 7–19.

7. Богатова, Т. В. Преимущества и особенности безопасных природных утеплителей / Т. В. Богатова, А. И. Двойцына // Инженерные сети и сооружения. – 2016. – № 3–4 (24–25). – С. 14–19.

8. Rozyev, M. Thermal insulation material, using waste cotton production as a placeholder / M. Rozyev, A. Bakatovich // XI Junior Researchers, Conference. European & national dimension in research. Architecture and civil engineering. Polotsk state University. – Novopolotsk : PSU, 2019. – № 11. – P. 64–66.

9. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers / X. Zhou, F. Zheng, H. Li, C. Lu // Energy and Buildings. – 2010. – № 42. – P. 1070–1074. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.01.020.

10. Romanovskiy, S. Insulating material on the basis of bark fibre of the olive palm tree / S. Romanovskiy, A. Bakatovich // European and National Dimension in Research: IX Junior Researchers , Conference, Novopolotsk, April 26–27, 2017: in 3 p. // Polotsk stage University. – Novopolotsk : PSU, 2017. – P. 104–107.

11. Manohar, K. Building Thermal Insulation – Biodegradable Sugarcane and Coconut Fiber / K. Manohar, David W. Yarbrough, G. S Kochhar // Journal of Thermal Envelope and Building Science. – 2000. – № 23 (3). – P. 263–276. – DOI: 10.1177/174425910002300308.

12. Конюхов, М. В. Утеплитель из джутовых волокон / М. В. Конюхов, Е. В. Послед // Электронный сборник трудов молодых специалистов Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой. – 2022. – Вып. 44 (114): Прикладные науки. Строительство. – С. 69–70.

УДК 691.327.332

## **МЕТОДИКА И ПРИМЕР РАСЧЕТА СОСТАВА НЕАВТОКЛАВНОГО ЯЧЕИСТОГО ГАЗОБЕТОНА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ФРАКЦИЙ ГРАНИТНОГО ОТСЕВА**

*Ю. Д. Самуйлов<sup>1</sup>, Э. И. Батяновский<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *М. т. н., мл.н.с. НИИЛ БУСМ филиала «НИПИ» БНТУ, Минск, Беларусь,  
e-mail: ppublikatsii@mail.ru*

<sup>2</sup> *Д. т. н., профессор каф. СМУТС СФ БНТУ, Минск, Беларусь,  
e-mail: bat47@tut.by*

### **Реферат**

Широкое использование теплоизоляционных строительных материалов на строительных площадках Республики Беларусь ярко демонстрирует высокий спрос на данный сегмент продукции. Однако данный вид строительных материалов на сегодняшний день представлен в основном газосиликатными и ке-

рамзитобетонными блоками, а также минеральной ватой и различного рода вспененными полимерами.

В качестве альтернативы предлагается использование технологии неавтоклавного газобетона, которая позволяет заполнять полости съёмных и несъёмных опалубок ограждающих и перегородочных строительных конструкций вспученной газобетонной смесью и получать готовые теплоизолирующие конструкции без применения кладочных работ и расходов на клеевые материалы для кладки штучных блочных изделий. Данная технология дополнительно решает вопрос утилизации тонких фракций гранитных отсеков производства РУПП «Гранит», г. Микашевичи.

**Ключевые слова:** ячеистый бетон, неавтоклавный газобетон, газобетонная смесь, микрозаполнитель для ячеистого бетона, состав газобетонной смеси.

### **Введение**

На сегодняшний день в Республике Беларусь теплоизоляционные строительные материалы используются повсеместно.

Газосиликатные и керамзитобетонные блоки используются в качестве теплоизоляционного заполнения железобетонных каркасов сборного и монолитного домостроения, а также в качестве конструкционно-теплоизоляционных строительных материалов при блочной технологии возведения малоэтажных зданий: при строительстве частных домов, коттеджей и так далее [1–7].

Однако технология возведения ограждающих и перегородочных конструкций, а также заполнение железобетонных сборных и монолитных каркасов теплоизоляционными штучными блочными изделиями требует дополнительных расходов трудовых ресурсов и клеевых строительных материалов для проведения кладочных работ. В связи с этим более рационально использование технологии неавтоклавного газобетона для заполнения съёмных и несъёмных опалубок при устройстве стен зданий, позволяющее получать теплоизолированные ограждающие и перегородочные конструкции, минуя трудоёмкие кладочные работы и расходы на приобретение и приготовление клеевых сухих смесей.

Актуальность предлагаемой технологии неавтоклавного газобетона ещё более выражена тем, что в настоящее время активно развивается технология строительной 3D-печати [8] с использованием промышленных принтеров, работающих на базе бетонокомпозитных смесей, при которой формуется полый контур ограждающих и перегородочных конструкций, полости которого необходимо заполнять теплоизолирующим составом. Данная технология нереализуема с использованием штучных блочных изделий, в связи с этим для её реализации рекомендованы неавтоклавные пено- и газобетонные смеси, а также полимерные вспучиваемые составы. Так как теплоизоляционные материалы на основе полимеров являются горючими, они представляются менее эффективными и безопасными при производстве строительных работ и эксплуатации возведенных конструкций.

В связи со сказанным ранее очевидна целесообразность применения неавтоклавной технологии приготовления газобетонных смесей в современном строи-

тельстве, методику и пример расчёта состава которых автор приводит в данной статье.

Дополнительные преимущества использования данной технологии на строительных площадках Республики Беларусь выражены тем, что она позволяет эффективно утилизировать существующие отвалы отходов производства гранитного щебня, накопившиеся на территории предприятия РУПП «Гранит», г. Микашевичи.

### **Материалы, используемые для приготовления неавтоклавной газобетонной смеси**

*В качестве вяжущего* использовали портландцемент «ЦЕМ 1 42,5 Н» по ГОСТ 31108-2020 или «СЕМ 1 42,5N» по СТБ – ЕН 197-1-2020 (соответствует М500-Д0 по ГОСТ 10178-85, 2-й группы эффективности).

*В качестве ультрадисперсного микрозаполнителя* использовали сепарированный (Суд. ~ 20000 см<sup>2</sup>/г) гранитный отсев.

*В качестве газообразователя* применяли алюминиевую пудру ПАП-1.

*В качестве добавки для приготовления водной суспензии ПАП-1* использовали суперпластификатор на основе полиоксиэтиленовых производных полиметакриловой кислоты Реламикс ПК, отвечающей требованиям ТУ 5745-034-58042865-2008, производства АО ГК «Полипласт», Беларусь – Россия.

1. Задаются проектной плотностью газобетона, кг/м<sup>3</sup>. В данном случае принимаем 200 кг/м<sup>3</sup>.

2. Задаются соотношением (МЗ/Ц), исходя из того, что, чем ниже требуемая плотность бетона, тем выше (МЗ/Ц) и меньше расход цемента, диапазон рекомендуемых значений данного соотношения находится от 0,5 до 1. Принимаем МЗ/Ц=1.

3. Определяют расход цемента по формуле (1):

$$\text{Ц} = \frac{\rho_b \cdot V_{\phi}}{(1,15 + (\text{МЗ/Ц}))}, \text{ кг.} \quad (1)$$

После подстановки в формулу (1) фактических данных получаем следующее выражение:

$$\text{Ц} = \frac{200 \cdot 1}{(1,15 + 1)} = 93, \text{ кг.}$$

4. Определяют расход микрозаполнителя по формуле (2):

$$\text{МЗ} = \text{Ц} \cdot (\text{МЗ/Ц}), \text{ кг.} \quad (2)$$

После подстановки в формулу (2) фактических данных получаем следующее выражение:

$$\text{МЗ} = 93 \cdot 1 = 93, \text{ кг.}$$

5. Определяют суммарный расход твердых компонентов по формуле (3):

$$\text{Т} = \text{Ц} + \text{МЗ}, \text{ кг.} \quad (3)$$

После подстановки в формулу (3) фактических данных получаем следующее выражение:

$$T = 93 + 93 = 186, \text{ кг.}$$

### Методика и пример расчета состава неавтоклавного ячеистого газобетона теплоизоляционного назначения

**Таблица 1** – Обозначения, принятые в формулах методики расчета состава газобетонной смеси

№	Наименование показателей	Обозначение
1	2	3
1	Расход цемента на приготовление 1 м <sup>3</sup> газобетона, кг	Ц
2	Плотность готового газобетона в сухом [9] состоянии, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_b$
3	Объем полости формы, м <sup>3</sup>	$V_\phi$
4	Расход микрозаполнителя на приготовление 1 м <sup>3</sup> газобетона, кг	МЗ
5	Суммарный расход твердых компонентов на приготовление 1 м <sup>3</sup> газобетона, кг	T
6	Расход воды на приготовление 1 м <sup>3</sup> газобетона, кг	B
7	Истинная плотность микрозаполнителя (для гранита – 2670 кг/м <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{мз. ист.}}$
8	Истинная плотность цемента (3100 кг/м <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{ц. ист.}}$
9	Истинная плотность воды (1000 кг/м <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{в}}$
10	Объем залитой в форму ячеистобетонной смеси до газообразования, м <sup>3</sup>	$V_{\text{б.см.}}$
11	Коэффициент вспучивания (при текучести смеси 40 мм и вибровспучивании – 2,7 доли ед.)	$k_{\text{всп.}}$
12	Расход негашеной извести, кг	И
13	Активность газообразователя (ПАП-1), доли ед.	$A_{\text{г}}$
14	Активность негашеной извести, доли ед.	$A_{\text{и}}$
15	Массовая доля свободного СаО в цементе, доли ед.	$\omega_{\text{СаО}}$
16	Расход добавки-пластификатора на приготовление 1 м <sup>3</sup> газобетона, кг	Д
17	Расход газообразователя на приготовление 1 м <sup>3</sup> газобетона, кг	Г

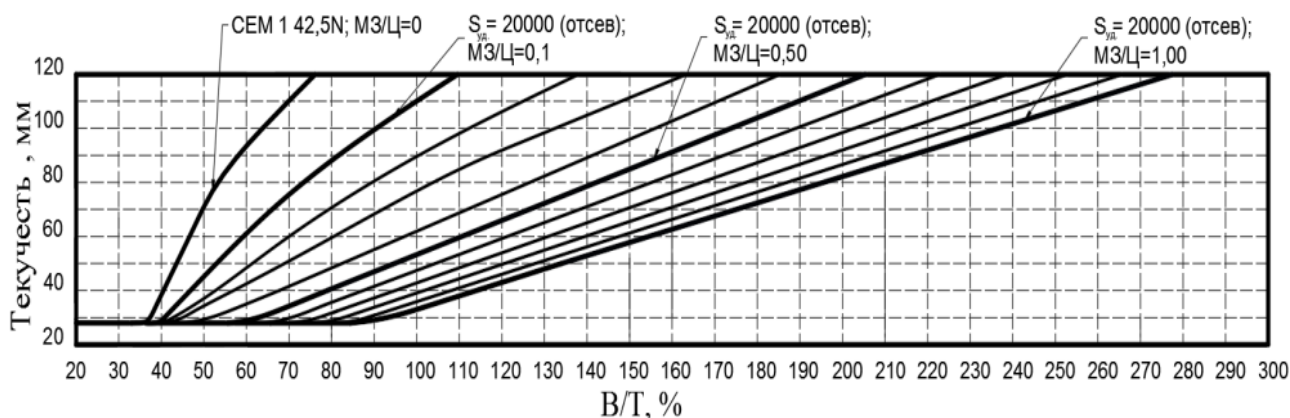
6. Определяют соотношение (B/T) для (МЗ/Ц) = 1, которое затем корректируют при необходимости, при условии, что оптимальное значение текучести соответствует 40 мм (рисунок 1). В данном случае принимаем (B/T) = 120 % или 1,2 доли ед.

7. Определяют расход воды по формуле (4):

$$B = T \cdot (B/T), \text{ кг.} \quad (4)$$

После подстановки в формулу (4) фактических данных получаем следующее выражение:

$$B = 186 \cdot 1,2 = 223, \text{ кг.}$$



**Рисунок 1** – Зависимость текучести от (В/Т) для различных соотношений (МЗ/Ц), при использовании в качестве микрозаполнителя пылевидных фракций гранитной породы с удельной поверхностью  $S_{уд} = 20000 \text{ см}^2/\text{г}$ .

8. Определяют объем залитой в форму ячеистобетонной смеси до газообразования по формуле (5):

$$V_{б.см.} = \frac{MЗ}{\rho_{MЗ \text{ ист.}}} + \frac{Ц}{\rho_{Ц \text{ ист.}}} + \frac{B}{\rho_B}, \text{ м}^3. \quad (5)$$

После подстановки в формулу (5) фактических данных получаем следующее выражение:

$$V_{б.см.} = \frac{93}{2670} + \frac{93}{3100} + \frac{223}{1000} = 0,29, \text{ м}^3.$$

9. При соблюдении правила, что  $V_{б.см.} \geq 0,25 \cdot V_{\phi}$ , уровень необходимого вспучивания бетона данного состава обеспечивается. Проверяем данное правило:

$$0,29 > 0,25 \cdot 1.$$

В данном случае правило соблюдается, следовательно, вспучивание газобетонной смеси до необходимого объема возможно.

Если при расчете объем невспученной газобетонной смеси выходит менее 25 % от объема внутренней полости формы, то необходимо увеличить соотношение (МЗ/Ц) и, соответственно, (В/Т), увеличив при этом объем смеси за счет увеличения содержания в ней воды, при сохранении ее оптимальной текучести ~ 40 мм.

10. Далее определяют расходы компонентов на  $1 \text{ м}^3$  смеси по следующим зависимостям:

10.1. Расход газообразователя ПАП-1 (пудра алюминиевая) по формуле (6):

$$\Gamma = \frac{1 - \left( \frac{MЗ}{\rho_{MЗ \text{ ист.}}} + \frac{Ц}{\rho_{Ц \text{ ист.}}} + \frac{B}{\rho_B} \right)}{0,25 \cdot k_{всп.}}, \text{ кг.} \quad (6)$$

После подстановки в формулу (6) фактических данных получаем следующее выражение:

$$\Gamma = \frac{1 - \left(\frac{93}{2670} + \frac{93}{3100} + \frac{223}{1000}\right)}{0,25 \cdot 2,7} = 1,06, \text{ кг.}$$

10.2. Количество добавки-пластификатора для приготовления газообразующей суспензии по формуле (7):

$$Д = \Gamma \cdot 0,167, \text{ кг.} \quad (7)$$

После подстановки в формулу (7) фактических данных получаем следующее выражение:

$$Д = 1,06 \cdot 0,167 = 0,18, \text{ кг.}$$

10.3. Расход негашеной извести по формуле (8):

$$И = \frac{\Gamma \cdot A_{\Gamma}}{54 \cdot A_{И}} \cdot 168,3 - \frac{Ц \cdot \omega_{CaO}}{A_{И}}, \text{ кг.} \quad (8)$$

После подстановки в формулу (8) фактических данных получаем следующее выражение:

$$И = \frac{1,06 \cdot 0,95}{54 \cdot 0,8} \cdot 168,3 - \frac{93 \cdot 0,0065}{0,8} = 3,16, \text{ кг.}$$

10.4. Расход дополнительной воды для гашения извести по формуле (9):

$$В_{г.и.} = \frac{И \cdot A_{И}}{56,1} \cdot 18. \quad (9)$$

После подстановки в формулу (9) фактических данных получаем следующее выражение:

$$В_{г.и.} = \frac{3,16 \cdot 0,8}{56,1} \cdot 18 = 0,81, \text{ кг.}$$

**Таблица 2** – Сводная таблица расходов компонентов газобетонной смеси на приготовление 1 м<sup>3</sup> газобетона плотностью 200 кг/м<sup>3</sup>

№	Наименование показателей	Обозначение
1	Расход цемента, кг	93
2	Расход микрозаполнителя, кг	93
3	Суммарный расход воды, кг (л)	224
4	Расход негашеной извести, кг	3,16
5	Расход добавки-пластификатора, кг	0,18
6	Расход газообразователя, кг	1,06

Апробация данного состава в лабораторных условиях позволила получить газобетон с фактической плотностью в сухом состоянии = 205 кг/м<sup>3</sup> [10] (что соответствует плотности теплоизоляционного ячеистого бетона марки D200 [11]), что подтверждает эффективность приведенного метода расчета состава газобетонной смеси.

## **Выводы**

1. Приведена методика расчёта состава смеси для приготовления неавтоклавного ячеистого газобетона на ультрадисперсном гранитном микрозаполнителя, которая актуальна для технологии неавтоклавного газобетона, рекомендованной для использования в монолитном строительстве и технологии строительной 3D-печати.

2. Представлен пример расчёта состава смеси для изготовления газобетона теплоизоляционного назначения.

3. Представлен результат апробации предлагаемой методики расчёта состава смеси для приготовления неавтоклавного ячеистого газобетона в лабораторных условиях, который подтверждает её эффективность.

## **Список использованных источников**

1. ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль» [сайт]. – 2021. – URL: <http://https://www.keramzit.by> (дата обращения: 21.04.2021).

2. Мордич, М. М. Технология и свойства керамзитопенобетона для монолитного и сборного строительства: диссертация ... канд. техн. наук: 05.23.05 / М. М. Мордич ; БНТУ. – Минск, 2020.

3. Батяновский, Э. И. Производство ячеистобетонных изделий автоклавного твердения : практическое пособие / Э. И. Батяновский, Н. М. Голубев, Н. Н. Сажнев. – Минск : Стринко, 2009. – 127 с.

4. Производство ячеистобетонных изделий. Теория и практика / Н. П. Сажнев, Н. Н. Сажнев, Н. Н. Сажнева, Н. М. Голубев – Минск : Стринко, 2010. – 460 с.

5. Опекунов, В. В. Пористые бетоны : моногр. / В. В. Опекунов. – Гродно : ГрГУ, 2011. – 193 с.

6. Галкин, С. Л. Применение ячеистобетонных изделий. Теория и практика / С. Л. Галкин, Н. П. Сажнев, Л. В. Соколовский. – Минск : Стринко, 2006. – 448 с.

7. Мордич, М. М. Технология и физико-механические свойства керамзитопенобетона для монолитного и сборного строительства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Мордич Михаил Михайлович. – Минск, 2019. – 24 с.

8. Строительная 3D-печать: оборудование, способы формования, сферы применения, особенности бетонокомпозитов / Д. В. Змушко, Е. С. Кохнович, О. Н. Скарина, Н. И. Мажанова // Актуальные проблемы технологии бетона и строительных материалов : материалы 73-й студенческой научно-технической конференции 12-18 мая 2017 г. / БНТУ, СФ; ред. Э. И. Батяновский, М. Г. Бортицкая. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 21–29.

9. Материалы строительные. Дизелькометрический метод измерения влажности : ГОСТ 21718-84. – Введ. 1985-07-01. – М. : Издательство стандартов, 1984. – 8 с.

10. Бетоны. Методы определения плотности : ГОСТ 12730.1-2020. – Введ. 2021-09-01. – М. : Стандартиформ, 2021. – 8 с.

11. Бетоны ячеистые. Технические условия : СТБ 1570-2005. – Введ. 1990-01-01. – Минск : Минстройархитектуры, 2005. – 24 с.

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ЭФФЕКТОМ РАСШИРЕНИЯ НА ОСНОВЕ СУЛЬФОАЛЮМИНАТА КАЛЬЦИЯ

*С. В. Самченко<sup>1</sup>, Н. С. Трунтов<sup>2</sup>, Ф. Б. Шукшин<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Д. т. н., профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения, ИПГС ФГБОУ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет e-mail: SamchenkoSV@mgsu.ru

<sup>2</sup> Студент 2-го курса 31 группы ИПГС ФГБОУ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, e-mail: n\_truntov@mail.ru

<sup>3</sup> Студент 2-го курса 31 группы ИПГС ФГБОУ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, e-mail: robin.dreik@yandex.ru

### Реферат

**Предмет исследования.** Композиционные материалы с эффектом расширения на основе добавок различной природы и противоположных по эффекту формирования структуры процессов расширения и уплотнения.

**Цели: описание целей исследования.** Определение прочностных и деформационных характеристик композиционного материала, состоящего из портландцемента, расширяющейся добавки сульфоалюмината кальция и пуццолановой добавки трепела и изучение структуры затвердевших образцов.

**Материалы и методы.** В качестве исходных материалов в работе использовались – портландцемент ЦЕМ I 42,5Н Евроцемент М500, сульфоалюминат кальция (САК) в виде тонкомолотого сульфоалюминатного цемента, а также гипсовый камень с содержанием  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – 93,20 %. В качестве пуццолановой добавки использовали трепел Хотынецкого месторождения с истинной плотностью 2,40 г/см<sup>3</sup>. Определяли прочность на сжатие образцов и их деформационные характеристики. Структура затвердевшего композиционного материала определялась электронно-микроскопическим анализом.

**Результаты.** Прочность образцов в одни сутки у композиционного материала на 26 % выше, чем у бездобавочного портландцемента, но при дальнейшем твердении прирост ее отстает в трех- и семисуточном возрасте и приближается к прочности контрольного образца только в 28 сут. Такое замедление роста прочности у композиционного материала обусловлено ростом расширения твердеющей системы до семи суток с последующей стабилизацией этой величины. У контрольных образцов портландцемента фиксируется усадка, что обуславливает более интенсивное нарастание прочности за счет уплотнения твердеющей структуры. Изучение структуры затвердевшей цементной пасты композиционного материала показало, что в его составе развиваются кристаллы этрингита, помимо этого, фиксируются высокоосновные и низкоосновные гидросиликаты кальция, которые формируют плотную структуру.

**Ключевые слова:** композиционные материалы с эффектом расширения, сульфоалюминат кальция, пуццолановая добавка трепел, электронно-микроскопический анализ, усадочная деформация, механизм расширения цементного камня, сульфоалюминатное расширение, оксидное расширение.

## **Введение**

Одной из основных проблем традиционных строительных материалов является их предрасположенность к усадке, вследствие которой могут появляться трещины, ухудшаться сцепление с основанием, а также снижаться прочность. Для снижения усадочных деформаций широко используются композиционные материалы с эффектом расширения. Такие материалы при твердении обеспечивают увеличение объема цементного камня, его уплотнение и самонапряжение, придают бетонам и растворам высокую водонепроницаемость, благодаря чему их успешно применяют для омоноличивания железобетонных элементов, а также изготовления самих железобетонных изделий.

Основными факторами, определяющими технические свойства композиционных материалов, является его рецептурный, природа расширяющегося компонента, минералогический состав портландцементного клинкера, гранулометрический состав цемента и его компонентов.

При признанной эффективности производства композиционным материалам с эффектом расширения в настоящее время не уделяется значительного внимания. Это касается не только расширения ассортимента специальных цементов, но и использование их для создания различных видов добавок, в которых развиваются различные процессы при гидратации и твердении цементных паст. Поэтому исследования совместного влияния расширяющихся добавок в сочетании с пуццолановыми добавками для создания композиционных материалов с эффектом расширения является актуальным.

Наиболее распространенным способом получения композиционных материалов с эффектом расширения является совместный помол портландцементного клинкера, гипса и добавок расширяющихся и пуццолановых [1]. В качестве расширяющихся добавок широкое распространение получили глиноземистые шлаки и сульфатированные клинкера [2, 34]. Такие добавки позволяют обеспечить постепенное расширение цементного камня и сохранять его в течение длительного времени. В качестве пуццолановых добавок используются как добавки природного (опоки, трепел и др.), так и добавки искусственного происхождения, например микрокремнезем [4].

Существует два основных механизма расширения цементного камня: оксидное расширение в процессе гидратации  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  до  $\text{Ca(OH)}_2$  и  $\text{Mg(OH)}_2$  и сульфоалюминатное расширение вследствие образования гидросульфоалюмината кальция.

Расширение возникает из-за раздвижения в результате гидратации кристаллического каркаса в твердеющей цементной пасте и увеличении её объёма. Дело в том, что гидроксиды кальция и магния имеют больший объём, чем исходные оксиды. Сульфатное расширение происходит из-за образования эттрингита ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot31\text{H}_2\text{O}$  гидросульфоалюмината кальция), его объём больше исходных компонентов более чем в два раза. Важно заметить, что образование

гидросульфоалюмината кальция и вызываемое им расширение должно проходить в начале твердения, когда мы имеем пластичное тесто, тогда можно избежать появления трещин и снижение качества материала. В результате сульфоалюминатного расширения появляется возможность достичь увеличения линейных размеров цементного камня на 4–5 %. Процесс расширения цементного камня будет длиться в течение всего процесса схватывания, и такое действие будет продолжаться в течение недели.

Среди факторов, определяющих технические свойства композиционных материалов, особое внимание уделяется дисперсности цемента и его компонентов. Дисперсность, как и гранулометрический состав различных видов расширяющихся добавок, оказывают существенное влияние на процессы гидратации и формирование структуры цементного камня, морфологию кристаллов эттрингита и в целом на свойства композиционных материалов с эффектом расширения. Мелкие фракции расширяющихся добавок обеспечивают образование большого количества центров кристаллизации, а частицы грубых фракций обуславливают рост крупных кристаллов. Для расширяющихся добавок на основе сульфоалюмината кальция предпочтителен полифракционный состав, где содержание минералов должно быть как в мелких фракциях ( $< 28$  мкм), так и крупных фракциях (45–63 мкм) [5–7].

На образование и рост кристаллов эттрингита влияет присутствие полимерных функциональных добавок. Это обусловлено тем, что присутствие в жидкой фазе поверхностно-активных веществ приводит к созданию большого количества центров кристаллизации и росту мелковолокнистых или мелкоигольчатых кристаллов эттрингитовой фазы, что способствует формированию плотной и прочной структуры цементного камня, при гидратации вяжущих композиций на основе сульфоалюминатного цемента [8–10].

Остается открытым вопрос о совместном протекании двух противоположных по эффекту формирования структуры процессов расширения и уплотнения. Уплотнение цементного камня происходит в результате пуццолановой реакции реактивного кремнезема с гидроксидом кальция с образованием мелких низкоосновных гидросиликатов кальция. Поэтому целью данного исследования было определение прочностных и деформационных характеристик композиционного материала, состоящего из портландцемента, расширяющейся добавки сульфоалюмината кальция и пуццолановой добавки трепела и изучение структуры затвердевших образцов.

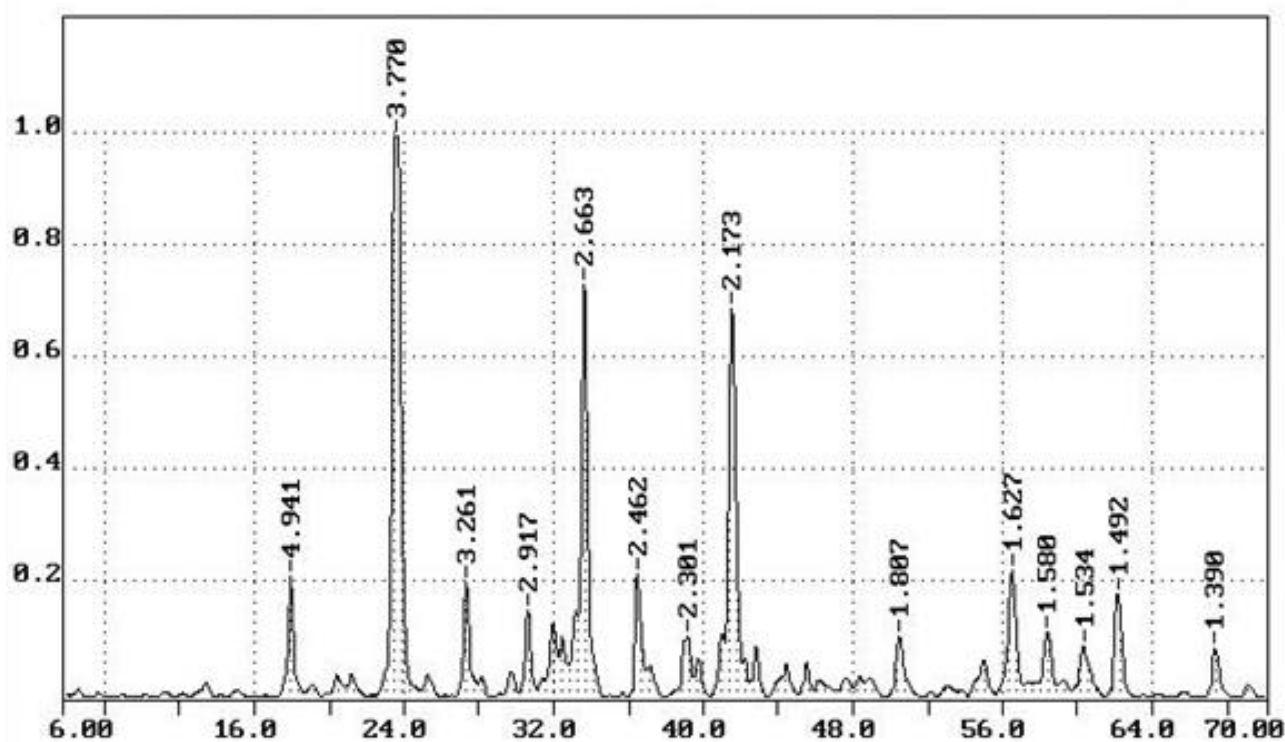
В качестве исходных материалов в работе использовались портландцемент ЦЕМ I 42,5Н Евроцемент М500 с техническими условиями по ГОСТ 31108-2020, ГОСТ 30515-2013, сульфоалюминат кальция (САК) в виде тонкомолотого сульфоалюмоферритного цемента, а также гипсовый камень с содержанием  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – 93,20 %. В качестве пуццолановой добавки использовали трепел Хотынецкого месторождения с истинной плотностью 2,40 г/см<sup>3</sup>. Химический состав материалов представлен в таблице 1.

Сульфоалюминатный цемент имел размер зерен от нескольких мкм до 25–30 мкм. Его минералогический состав по данным рентгенофазового анализа состоит из белита (30 %) и идентифицируется по отражениям  $d = 0,2785$  нм.

**Таблица 1** – Химический состав исходных материалов

№ п.п.	Наименование	Содержание оксидов, масс. %							
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	ППП
1	Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	20,10	4,56	8,72	62,75	1,99	0,57	1,58	0,92
2	Сульфоалюминатный цемент	12,77	14,73	3,20	51,45	1,76	10,45	1,14	2,70
3	Трепел	67,33	10,68	9,36	0,80	0,84	–	3,35	7,64

Сульфоалюмината кальция содержится 65–70 % и идентифицируется по отражениям  $d = 0,372; 0,263; 0,215$  нм (рисунок 1).



**Рисунок 1** – Рентгенограмма сульфоалюминатного цемента

Физико-механические испытания цементного камня проводились в соответствии с ГОСТ 30744-2001. Для оценки прочности цементного камня на 1, 3, 7 и 28 суток были подготовлены образцы-кубики размерами граней 2×2×2 см при водоцементном отношении, равном 0,4. Образцы выдерживались в нормальных условиях (температура  $t = 20 \pm 2$  °С, влажность  $W = 95$  %) в камере нормального твердения CURACEM 65-L0013/D. Прочность образцов определялась с использованием гидравлического пресса CONTROLS MCC8 50-C8422.

Деформация цементного камня и бетона были измерены в течение 28 суток при погружении (в нормальном условии) в воду. Для измерений использовались образцы-балочки размером 4×4×16 см при водоцементном отношении, равном 0,4. Измерение деформаций образцов проводилось с помощью устройства для сравнения длины модели CONTROLS 62-L0035/A. Расчет деформации

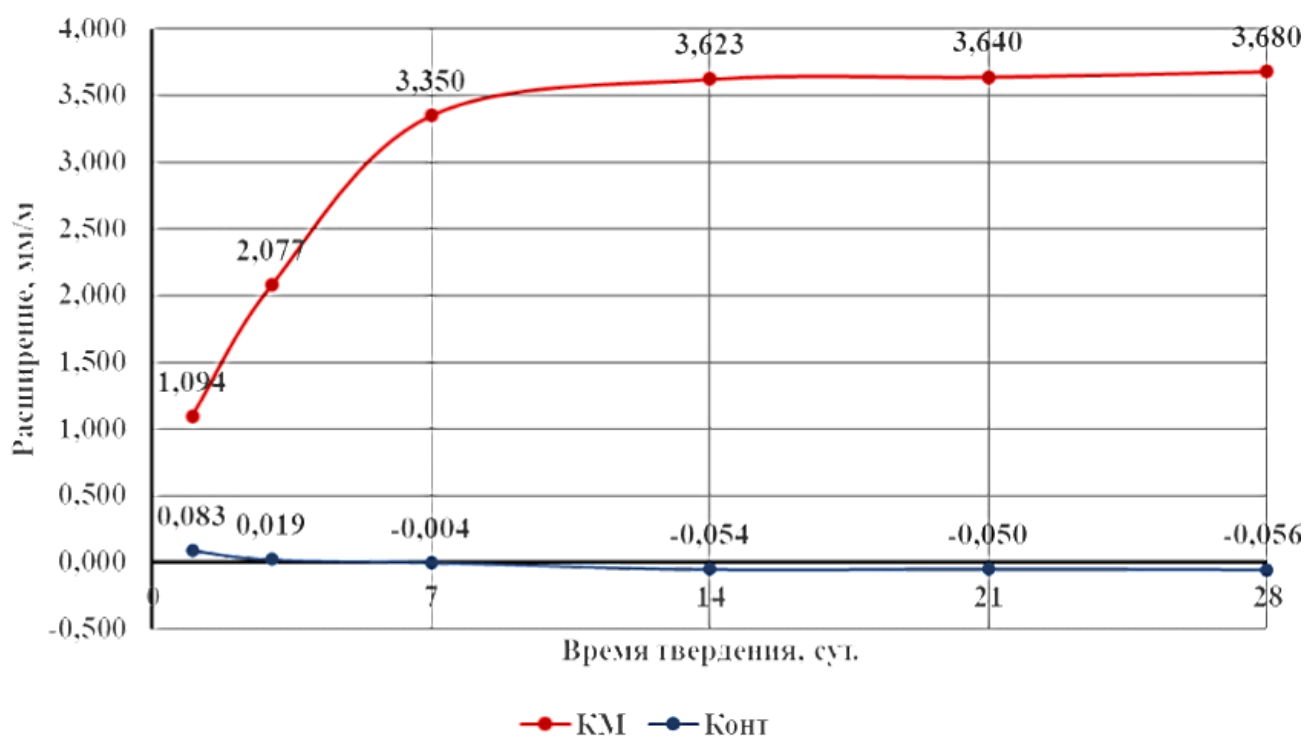
цемента выполнялся в соответствии с ГОСТ Р 56727-2015, а расхождения между результатами трех измерений оценивались согласно ГОСТ 11052-74 ( $\pm 15\%$ ).

По результатам исследования выяснилось, что композиционный материал с эффектом расширения для исследования готовился смешением предварительно размолотых компонентов. Соотношение компонентов было следующим: ПЦ – 65 %, САК – 15 %, Гипс – 10 %, Трепел 10 %. В качестве контрольного образца использовался бездобавочный портландцемент.

Образцы после их изготовления хранили в воде (нормальные условия хранения). Через 1, 3, 7, 14, 21 и 28 суток образцы испытывались на прочность и расширение. Полученные прочностные характеристики приведены в таблице 2, деформационные характеристики представлены на рисунке 2.

**Таблица 2** – Прочностные характеристики испытанных образцов (МПа)

№ п.п.	Наименование образца	Время твердения, сут.					
		1	3	7	14	21	28
1	контрольный	10,4	43,2	51,3	55,2	58,6	62,2
2	композиционный	14,15	37,3	46,8	52,1	55,0	59,7



**Рисунок 2** – Кинетика расширения образцов композиционного материала и контрольного портландцемента

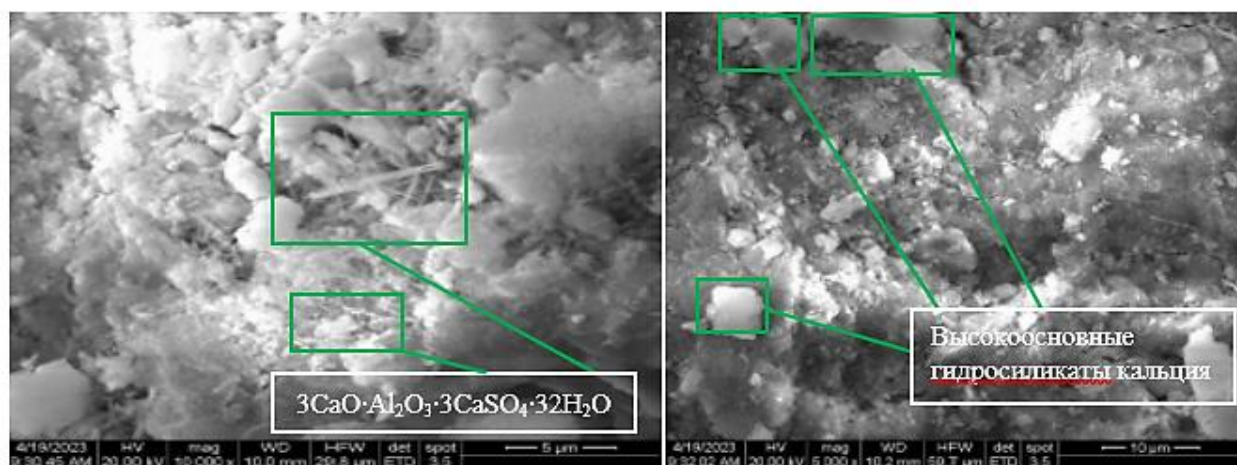
Согласно полученным данным прочность в одни сутки у композиционного материала на 26 % выше, чем у бездобавочного состава, но при дальнейшем твердении прирост ее отстает от прочности бездобавочного портландцемента в трех- и семисуточном возрасте и приближается к прочности контрольного образца только в 28 сут. Такое замедление роста прочности у композиционного

материала обусловлено ростом расширения твердеющей системы до семи суток с последующей стабилизацией этой величины. У контрольных образцов портландцемента фиксируется усадка, что обуславливает более интенсивное нарастание прочности (рисунок 2).

Микроструктура цементного камня и продукты гидратации исследуемых составов в возрасте 28 сут. изучали с помощью электронной сканирующей микроскопии. Полученные данные представлены на рисунке 3.

Как видно из представленных результатов, в структуре затвердевшей цементной пасты композиционного материала развиваются кристаллы этtringита, на фотографии видны как игольчатые и призматические кристаллы. Помимо этого, фиксируются высокоосновные и низкоосновные гидросиликаты кальция, которые формируют плотную структуру.

Таким образом, согласно полученным экспериментальным результатам, использование в составе композиционного вяжущего добавок различной природы и различного действия приводит к направленному формированию кристаллизационной структуры в твердеющей цементной пасте в начальный момент в сочетании с развивающейся коагуляционной структурой в сформированном каркасе, что улучшает структуру цементной пасты.



**Рисунок 3** – Электронные микрофотографии затвердевшей цементной пасты композиционного материала в возрасте 28 сут.

Определение прочностных и деформационных характеристик композиционного материала, состоящего из портландцемента, расширяющейся добавки сульфoалюмината кальция и пуццолановой добавки трепела позволяет констатировать о получении композиционного материала с эффектом расширения.

### **Выводы**

Определение прочностных и деформационных характеристик композиционного материала, состоящего из портландцемента, расширяющейся добавки сульфoалюмината кальция и пуццолановой добавки трепела позволяет констатировать о получении композиционного материала с эффектом расширения.

### Список использованных источников

1. Кривобородов, Ю. Р. Специальные цементы: разновидности, свойства и применение / Ю. Р. Кривобородов // Техника и технология силикатов. – 2023. – Т. 30, № 1. – С. 84–91.
2. Кузнецова, Т. В. Производство и применение сульфоалюминатных цемента / Т. В. Кузнецова // Строительные материалы. – 2010. – № 3. – С. 29–32.
3. Кузнецова, Т. В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы / Т. В. Кузнецова. – М. : Стройиздат, 1986. – 208 с.
4. Гусев, Б. В. Технология портландцемента и его разновидностей: Учебное пособие / Б. В. Гусев, Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко. – М. : Ай Пи Эр Медиа, 2016. – 113 с.
5. Самченко, С. В. Влияние дисперсности расширяющегося компонента на свойства цементов / С. В. Самченко, Д. А. Зорин // Техника и технология силикатов. – 2006. – Т. 13, № 2. – С. 2–7.
6. Samchenko, S. V. Influence of fineness of expansive components on cement properties / S. V. Samchenko, D. A. Zorin // Cement, Wapno, Beton. – 2008. – No. 5. – P. 254–257.
7. Samchenko, S. V. Minerals of expansive and non-shrinkage sulfomineral cement / S. V. Samchenko, D. A. Zorin, Y. R. Krivoborodov // MATEC Web of Conferences, Saint-Petersburg, November 15–17, 2016. Vol. 106. – Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2017. – P. 03006. – DOI: 10.1051/matecconf/201710603006.
8. Самченко, С. В. Роль этtringита в формировании и генезисе структуры камня специальных цементов / С. В. Самченко ; Федер. агентство по образованию, РХТУ им. Д. И. Менделеева, Издат. центр. – М. : Рос. хим.-технол. ун-т им. Д. И. Менделеева, 2005. – 154 с.
9. Самченко, С. В. Влияние суперпластификатора на морфологию кристаллов этtringита / С. В. Самченко, Е. М. Макаров // Техника и технология силикатов. – 2015. – Т. 22, № 2. – С. 17–21.
10. Самченко, С. В. Образование и рост кристаллов этtringита в присутствии полимерных функциональных добавок / С. В. Самченко, Е. М. Макаров // Успехи современной науки и образования. – 2016. – Т. 5, № 12. – С. 118–122.

УДК 624.15:692.115

## СООРУЖЕНИЕ ЦЕМЕНТНО-ГРУНТОВЫХ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ

*Н. Г. Серегин*

*К. т. н., доцент кафедры промышленного и гражданского строительства,  
Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия, e-mail:  
SereginNG@mgsu.ru*

## Реферат

В статье рассмотрено сооружение цементно-грунтовых свайных фундаментов методом бурения и перемешивания с механоактивацией грунтов. Проанализированы различные конструкции и технологии возведения свайных фундаментов. Описаны основные и наиболее перспективные технологические процессы изготовления свайных фундаментов. Обоснованы преимущества возведения свайных фундаментов методом бурения и перемешивания с механоактивацией грунтов. Представлены результаты исследований, сравнивающих технические показатели при сооружении различных типов и конструкций свайных фундаментов. Приведены выводы и рекомендации по возведению цементно-грунтовых свайных фундаментов.

**Ключевые слова:** свайные фундаменты, сваи на цементной основе, цементно-грунтовые сваи, буросмешивающий метод, механоактивация грунтов.

## Введение

Долговечность и безаварийность зданий и сооружений во многом определяются конструкцией и технологией производства оснований и фундаментов при возведении объектов промышленного и гражданского строительства. А многообразие вариантов возведения оснований и фундаментов расширяет возможности оптимизации строительства на «нулевом цикле» [1–4]. Существенное сокращение затрат при разработке и возведении оснований зданий и сооружений позволяет применение свайных фундаментов, объём внедрения которых возрастает с каждым годом.

Конструкции и технологии возведения свайных фундаментов зависят от вида грунта, формы и размеров строительных площадок. Очень важно обладать достоверной и полной информацией о свойствах грунтов на строительных площадках. Для возведения свайных фундаментов максимально целесообразно применение местных строительных материалов, укрепленных связующим, например цементом. Однако разнообразные климатические, грунтовые и гидрологические условия предъявляют повышенные требования к физико-механическим свойствам укрепленных цементом грунтов. Кроме того, низкая морозостойкость является ещё одним недостатком цементогрунтов, который значительно снижает эксплуатационную надёжность верхней части оснований и фундаментов зданий и сооружений. На прочностные характеристики цементогрунтов также влияет степень измельчения грунтового компонента перед добавлением его в цементно-грунтовую смесь и получением нового связующего для устройства цементно-грунтовых свай буросмесительным способом [5–8].

Только комплексное изучение процессов, происходящих в цементогрунтах, позволит повысить технологичность возведения свайных фундаментов, выполненных на основе цементогрунтов. Выбор оптимального состава цементно-грунтовой смеси в интересах повышения технологичности производства свайных работ с учётом повышения их морозостойкости требует проведения комплексных исследований. Совершенствование технологии возведения цементно-грунтовых свай с применением механоактивации позволяет обеспечить потребности строительной отрасли в дешёвых строительных материалах на основе местных грунтов.

## Материалы и методы

При освоении под строительные площадки территорий, которые ранее не застраивались по причине сложности инженерно-геологических условий из-за неоднородности грунтов. Проектные организации всё чаще применяют сваи при конструировании фундаментов зданий и сооружений.

В последнее время применяют различные конструкции и технологии изготовления свай. Широкое распространение получили сваи заводского изготовления: винтовые, забивные и другие конструкции.

Существуют различные технологии изготовления свайного фундамента непосредственно на строительной площадке. Например, технологический процесс, состоящий из пяти этапов. На первом этапе бурильной установкой формируют в грунте скважину под будущую сваю. На втором этапе в скважину, полученную на первом этапе технологического процесса, погружают трубу соответствующего диаметра, которая выполняет роль опалубки. На третьем этапе в трубе размещают стальной арматурный каркас. На четвертом этапе стальной арматурный каркас заливают бетонной смесью. Бетонную смесь уплотняют вибратором. Не дожидаясь отверждения бетонной смеси, на пятом этапе из сырого бетонного раствора извлекают трубу. После отверждения бетонной смеси полученная свая готова для дальнейшего сооружения фундамента.

К достоинствам рассмотренной технологии изготовления свайного фундамента следует отнести:

- возможность сооружать фундамент строящегося здания или сооружения вблизи существующих построек, так как данная технология относится к категории безударных;
- полученный по данной технологии фундамент обладает большой несущей способностью;
- существует возможность устройства фундамента по данной технологии в любых грунтовых условиях.

Недостатками рассмотренной технологии изготовления свайного фундамента являются необходимость прогрева бетонной смеси в зимнее время, так как бетонирование происходит в полевых условиях, и сложность контроля качества формирования скважины.

Однако при строительстве зданий и сооружений, особенно на неоднородных грунтах в сложных инженерно-геологических условиях, свайные фундаменты составляют примерно 25 % от общего объема сооружаемых фундаментов. Поэтому исследования по совершенствованию технологии их возведения на сегодняшний день весьма актуальны. Особенно технологии, позволяющие при обеспечении прочности и надёжности свайных фундаментов снизить трудоёмкость и стоимость изготовления.

Одним из наиболее перспективных способов сооружения свайных фундаментов является буросмесительный способ [9–12].

Буросмесительный способ сооружения свайных фундаментов позволяет закреплять все виды структурно-неустойчивых и слабых грунтов независимо от их влажности и расположения горизонта подземных вод. Буросмесительный способ является достаточно экономичным:

- благодаря использованию в составе материала свай местных грунтов;

- благодаря низкой стоимости технологического процесса;
- благодаря высокому уровню механизации работ;
- благодаря перспективе закрепления грунтов под строящимся объектом, таких как присадочные грунты любой влажности и активности, глинистые текучие и текуче-пластичные грунты, а также рыхлые водонасыщенные пески.

Этому способу характерны экологическая чистота и возможность применения как для сооружения фундаментов новых зданий и сооружений, так и для реконструкции уже существующих.

Многолетний опыт укрепления грунтов подтверждает необходимость совершенствования методов улучшения свойств цементно-грунтовых свайных фундаментов [13–15]. Одним из них является метод механоактивации грунтов, позволяющий снизить расход цемента и повысить прочность цементно-грунтовых свайных фундаментов.

Буросмесительный способ сооружения свайных фундаментов с механоактивацией грунтов может быть реализован путём применения буросмесительных машин, буровых установок, а также полых буровых штанг, обеспечивающих принудительную подачу бурового состава.

Технологическая схема изготовления цементно-грунтовых свай буросмесительным способом с применением механоактивации грунта состоит из следующих операций: устройство приямок, погружение буросмесителя и перевод грунта в тягучее состояние, заполнение скважины грунтом тягучей консистенции, выглубление буросмесителя и подача водогрунтоцементного раствора.

Устройство приямка осуществляют бурением приёмной скважины диаметром на 0,1 метра больше диаметра сооружаемой сваи и глубиной 0,5–2 метра в зависимости от длины будущей сваи и физико-механических свойств грунта. Приёмная скважина предназначена для приёма избытка цементогрунтовой смеси, возникшей при подаче в грунт воды и цемента. Извлечённый из скважины грунт применяют для приготовления механоактивированной цементогрунтовой смеси. В зависимости от физико-механических свойств грунта и количества вводимого связующего определяют глубину скважины.

Погружение буросмесителя и перевод грунта в тягучее состояние выполняют бурением грунта лопастным буросмесителем и подачей воды для перевода размельчённого грунта в тягучее состояние.

Заполнение скважины грунтом тягучей консистенции производят путём подачи воды при погружении буросмесителя в грунт. В этом случае одновременно происходят два процесса: резание грунта и его увлажнение до тягучего состояния.

Выглубление буросмесителя и подача водогрунтоцементного раствора происходит путём извлечения буросмесителя с одновременной подачей водогрунтоцементной смеси в необходимом объёме для поступления в грунтовую массу расчётного количества цемента.

Сооружение свайного фундамента в текучих смесях по сравнению с пластичными в три раза уменьшает время погружения и извлечения буросмесителя за счёт увеличения частоты вращения до 130 об/мин и в два-три раза снижает усилие резания грунта. А также разработка грунта буросмесителем с подачей в

скважину заданного объёма воды для перевода грунта в тягучее состояние позволяет получить грунт необходимой степени измельчения.

Основными преимуществами буросмесительного способа сооружения свайных фундаментов с механоактивацией грунтов являются применения в качестве материала свай местного грунта, извлечённого непосредственно из скважины, и возможность монтажа свай рядом с существующими фундаментами и другими подземными сооружениями, не подвергая их повреждению.

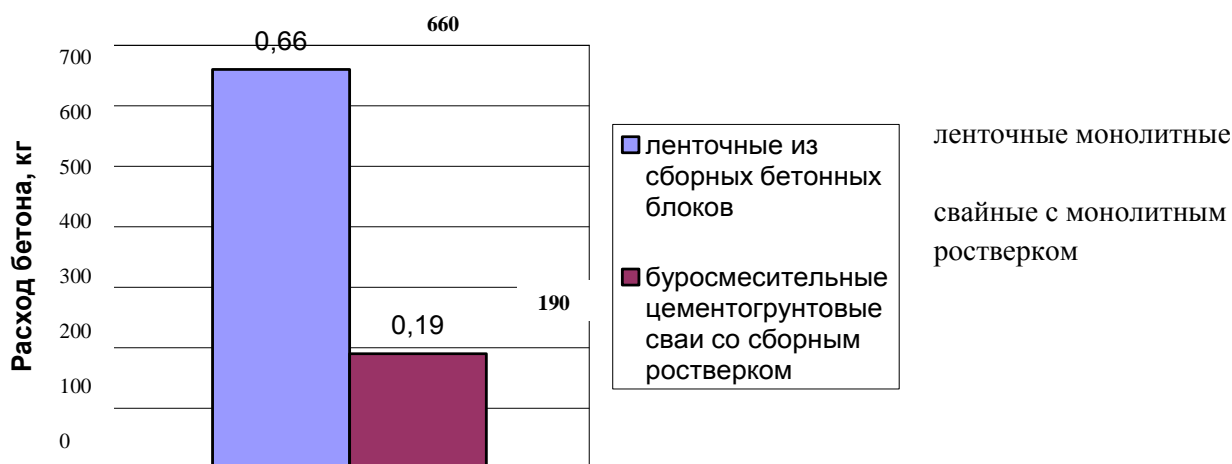
### Результаты исследования

Как уже выше было сказано, основной причиной высокой эффективности сооружения свайных фундаментов буросмесительным способом с механоактивацией из цементогрунтов является применение в качестве основного материала местных грунтов, из которых возможно получение материала с высокими прочностными характеристиками. Особенно это относится к районам бедным каменными строительными материалами, а такие районы составляют 15 % территории Российской Федерации. Поэтому применение в качестве основного материала для свайных фундаментов местных грунтов при формировании цементогрунта даёт реальное практическое преимущество.

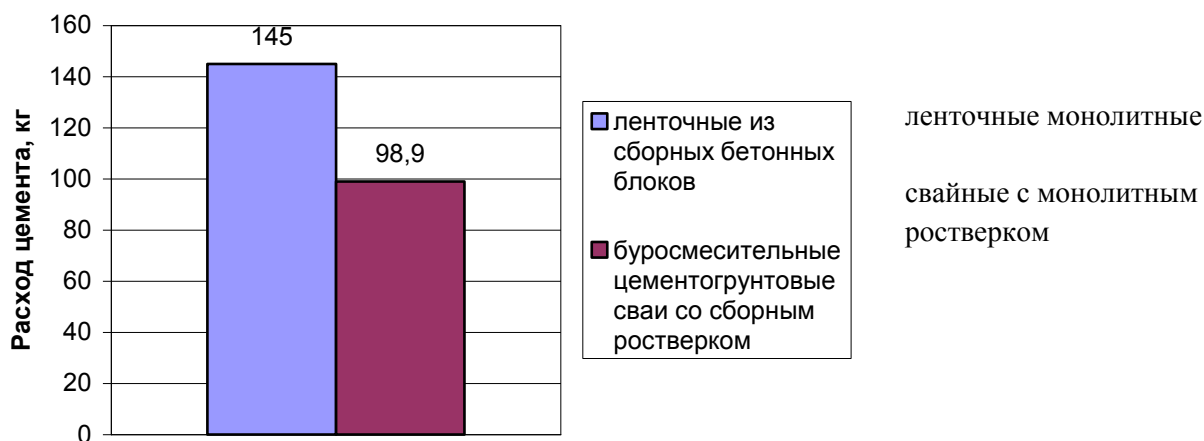
Производство цементно-грунтовых свай буросмесительным способом на основе механоактивированного связующего обеспечивает высокую экономическую эффективность за счёт расхода цемента, являющегося главным дорогостоящим компонентом.

На первом этапе исследований проведено сравнение техниких показателей при сооружении ленточных монолитных фундаментов и фундаментов на буросмесительных цементных сваях с монолитным ростверком. Диаграммы расчётов представлены на рисунках 1–4.

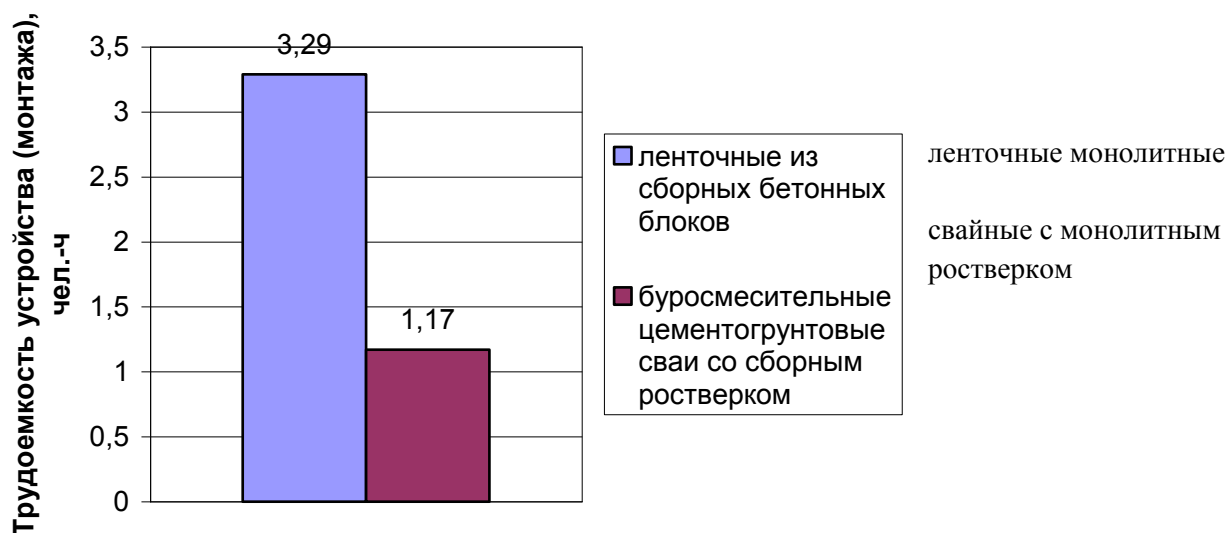
При выполнении расчётов технические показатели приведены на один погонный метр стен малоэтажных зданий с ленточными монолитными фундаментами и фундаментами на буросмесительных цементных сваях с монолитным ростверком при нагрузке десять тонн на погонный метр.



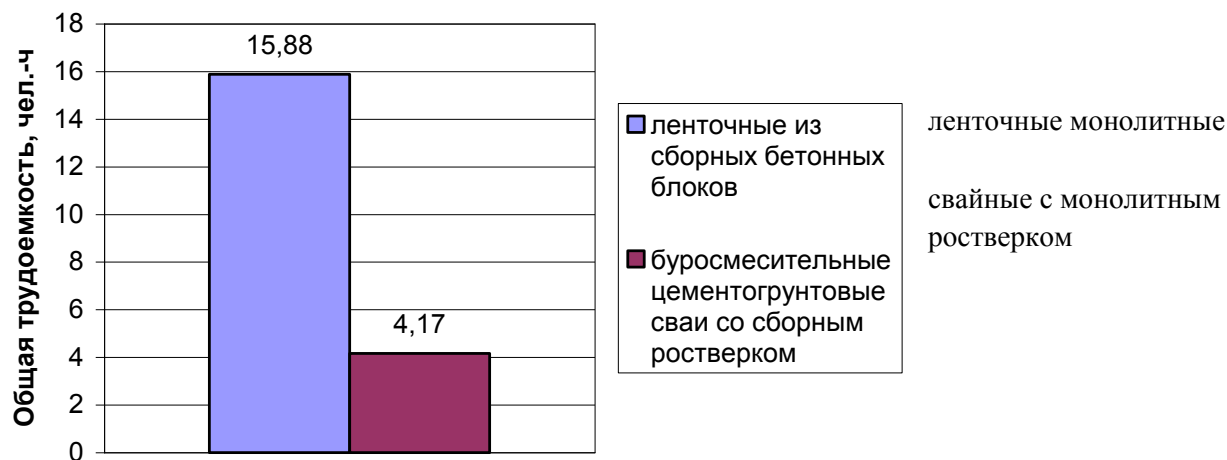
**Рисунок 1** – Расход бетона при сооружении ленточных и свайных монолитных фундаментов



**Рисунок 2** – Расход цемента при сооружении ленточных и свайных монолитных фундаментов



**Рисунок 3** – Трудоёмкость устройства (монтажа) ленточных и свайных монолитных фундаментов



**Рисунок 4** – Общая сложность сооружения ленточных и свайных монолитных фундаментов

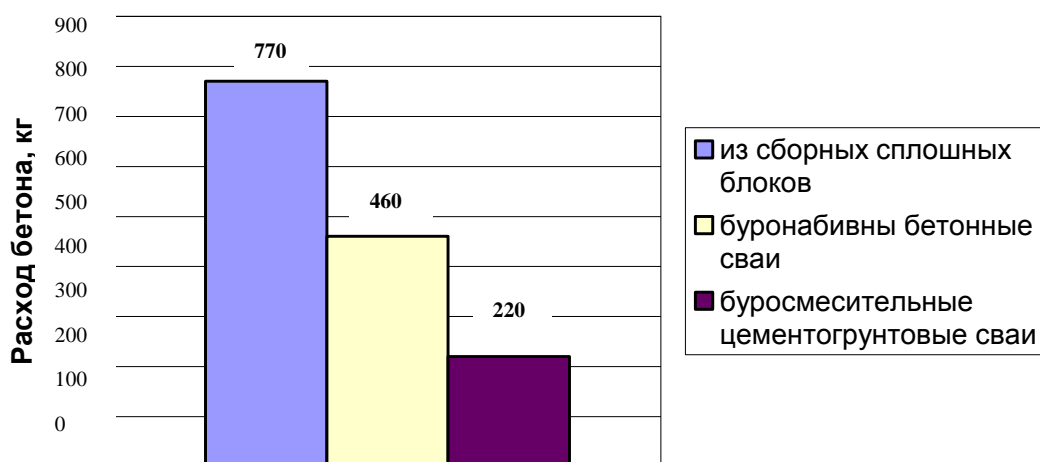
Для наглядности результаты исследований первого этапа сведены в таблицу 1.

**Таблица 1** – Результаты первого этапа исследования

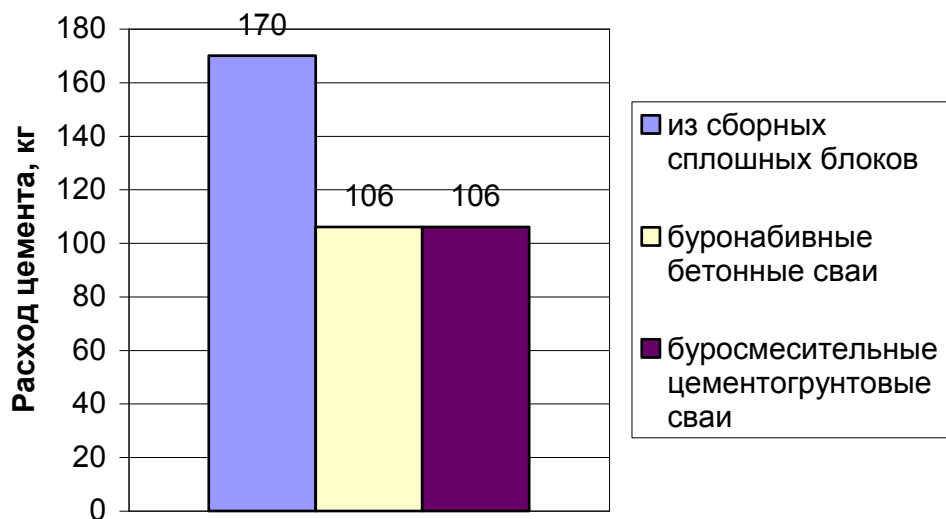
Наименование рассматриваемого показателя	Вид фундамента	
	Ленточный монолитный	Буромесительные цементные сваи с монолитным ростверком
Расход бетона	660 кг	190 кг
Расход цемента	145 кг	98,9 кг
Трудоёмкость монтажа	3,29 чел. часа	1,17 чел. часа
Общая трудоёмкость	15,88 чел. часа	4,17 чел. часа

В результате сравнительного расчёта техниких показателей при сооружении ленточных монолитных фундаментов и фундаментов на буромесительных цементных сваях с монолитным ростверком можно утверждать о значительном преимуществе фундаментов на буромесительных цементных сваях с монолитным ростверком перед ленточными монолитными фундаментами (таблица 1). Расход бетона при сооружении фундаментов на буромесительных цементных сваях с монолитным ростверком более чем в 3 раза меньше, чем при сооружении ленточных монолитных фундаментов. Расход цемента при сооружении фундаментов на буромесительных цементных сваях с монолитным ростверком почти в 1,5 раза меньше, чем при сооружении ленточных монолитных фундаментов. Трудоёмкость монтажа, общая трудоёмкость и приведённые затраты при сооружении фундаментов на буромесительных цементных сваях с монолитным ростверком почти в 3 раза меньше, чем при сооружении ленточных монолитных фундаментов.

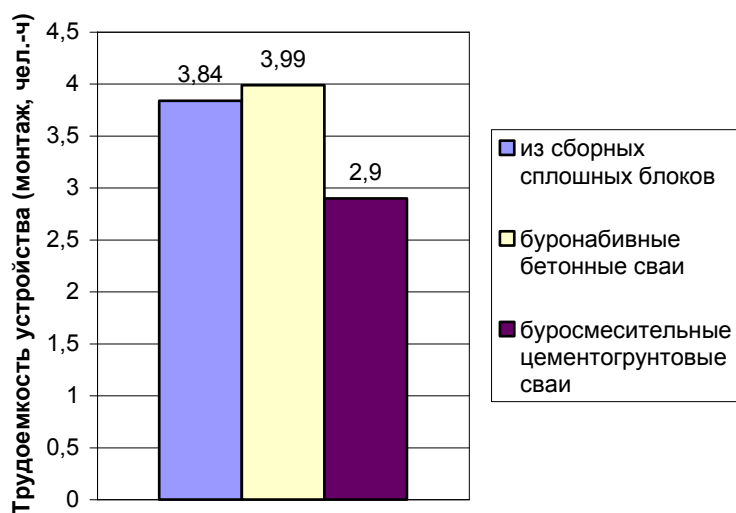
На втором этапе исследований проведено сравнение техниких показателей при сооружении фундаментов из сборных сплошных блоков, буронабивных бетонных свай и буромесительных цементогрунтовых свай. Диаграммы расчётов представлены на рисунках 5–7.



**Рисунок 5** – Расход бетона при сооружении различных типов фундаментов



**Рисунок 6** – Расход цемента при сооружении различных типов фундаментов



**Рисунок 7** – Трудоемкость монтажа различных типов фундаментов

Для наглядности результаты исследований второго этапа сведены в таблицу 2.

**Таблица 2** – Результаты второго этапа исследования

Наименование рассматриваемого показателя	Вид фундамента		
	Из сборных сплошных блоков	Буринабивные бетонные сваи	Бурсмесительные цементно-грунтовые сваи
Расход бетона	770 кг	460 кг	220 кг
Расход цемента	170 кг	106 кг	106 кг
Трудоёмкость монтажа	3,84 чел. часа	3,99 чел. часа	2,9 чел. часа

В результате сравнительного расчёта техниких показателей при сооружении фундаментов из сборных сплошных блоков, буронабивных бетонных свай и бурсмесительных цементно-грунтовых свай можно утверждать о значительном преимуществе фундаментов на бурсмесительных цементно-грунтовых сваях перед фундаментами из сборных сплошных блоков и буронабивных бетонных свай (таблица 2). Обращает на себя внимание равенство значений техникого показателя расхода цемента при сооружении фундаментов на буронабивных бетонных и бурсмесительных цементогрунтовых сваях 106 килограмм. Однако это не снижает преимущества сооружения фундаментов на бурсмесительных цементно-грунтовых сваях перед фундаментами на буронабивных бетонных сваях. Возведение фундаментов на буронабивных бетонных сваях недопустимо рядом с существующими зданиями или сооружениями. Это связано с ударными воздействиями, которые необходимы при монтаже фундаментов на буронабивных бетонных сваях, способными нанести повреждения фундаментам рядом находящихся зданий или сооружений.

### **Выводы и рекомендации**

1. В результате сравнительного расчёта технических показателей при сооружении ленточных фундаментов из сборных бетонных блоков и фундаментов на бурсмесительных цементных сваях со сборным ростверком можно утверждать о значительном преимуществе фундаментов на бурсмесительных цементных сваях со сборным ростверком перед ленточными фундаментами из сборных бетонных блоков.

2. В результате сравнительного расчёта технических показателей при сооружении фундаментов из сборных сплошных блоков, буронабивных бетонных свай и бурсмесительных цементно-грунтовых свай можно утверждать о значительном преимуществе фундаментов на бурсмесительных цементно-грунтовых сваях перед фундаментами из сборных сплошных блоков и буронабивных бетонных свай.

3. Применение вместо железобетонных забивных свай буронабивных способствует укреплению грунтов и повышает технику эффективность строительного процесса.

4. Изготовление бурсмесительным способом с механоактивацией свай из цементогрунта снижает потребность в крупном заполнителе, не требует вывоз грунта со строительной площадки.

5. При сооружении фундамента вместе с цементом в качестве механоактивированного компонента применяют грунт из приямка.

6. Производство свай из цементогрунта бурсмесительным способом с механоактивацией минимизирует парк строительных машин и механизмов, сокращает количество строительных рабочих и снижает стоимость нулевого цикла.

### **Список использованных источников**

1. Серегин, Н. Г. Укрепление грунтов при возведении цементогрунтовых свай / Н. Г. Серегин // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 4. – С. 37–42. – DOI: 10.33622/0869-7019.2023.04.37-42.

2. Серегин, Н. Г. Механоактивационный способ получения вяжущего для устройства цементогрунтовых свай / Н. Г. Серегин, В. И. Запруднов // Лесной вестник / *Forestry Bulletin*. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 114–120. – DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-114-120.
3. Серегин, Н. Г. Определение оптимальных составов цементогрунтов при устройстве свайных фундаментов буросмесительным способом / Н. Г. Серегин, В. И. Запруднов // Лесной вестник / *Forestry Bulletin*. – 2021. – Т. 25, № 5. – С. 106–110. – DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-106-110.
4. Серегин, Н. Г. Исследования повышения несущей способности грунтов оснований методом цементации / Н. Г. Серегин, В. И. Запруднов // Лесной вестник / *Forestry Bulletin*. – 2020. – Т. 24, № 5. – С. 104–108. – DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-104-108.
5. Seregin, N. Comparative analysis of the cost of foundations of various types / N. Seregin // *E3S Web of Conferences* 549. – July 2024. – DOI: 10.1051/e3sconf/202454904016.
6. Seregin, N. Parametric model of cement soil / N. Seregin // *Lecture Notes in Civil Engineering* 180. – 2022. – DOI: 10.1007/978-3-030-83917-8-43.
7. Seregin, N. An integrated way to improve the properties of soil-cement pile foundations / N. Seregin // *E3S Web of Conferences* 157, 06006. – 2020.
8. Seregin, N. Feasibility for the implementation of cement piles / N. Seregin // *IOP Conf. Series: Mat. Science and Eng.* 953, 012093. – 2020.
9. Omarov, A. Investigations of piles by bidirectional static loading test in Astana soils / A. Omarov, A. Zhussupbekov, V. Kaliakin // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 457:02057.
10. Comparison of the results of different types of testing piles with static load to predict the load capacity of piles / A. Omarov, A. Zhussupbekov, V. Kaliakin [et al.] // *Journal of Applied Science and Engineering (Taiwan)*. – 2025. – Vol. 28 (1). – P. 163–174.
11. Bearing Capacity of Precast Concrete Joint Micropile Foundations in Embedded Layers: Predictions from Dynamic and Static Load Tests according to ASTM Standards / A. Omarov, A. Sarsembayeva, A. Zhussupbekov [et al.] // *Infrastructures*. – 2024. – Vol. 9 (7). – P. 104.
12. Features of testing piles for high-rise buildings in difficult soil conditions in Astana / S. Mussakhanova, A. Zhussupbekov, A. Omarov [et al.] // *International Journal of Geomate*. – 2023. – Vol. 25 (110). – P. 106–113.
13. Evaluation of the Structural Health Monitoring Results of the Applied Fiber Optics in the Pile Raft Foundations of a High-Rise Building / A. Buranbayeva, A. Zhussupbekov, A. Sarsembayeva, A. Omarov // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2022. – Vol. 12 (22). – P. 11728.
14. Investigation of the interaction of the bored micro pile by fdp technology with the soil ground / A. Issakulov, A. Omarov, A. Zhussupbekov [et al.] // *International Journal of Geomate*. – 2023. – Vol. 24 (105). – P. 11–17.
15. Buranbayeva, A. M. Numerical analysis and geomonitoring of behaviour of foundation of Abu-Dhabi Plaza in Nur-Sultan / A. M. Buranbayeva, A. Zhussupbekov, A. R. Omarov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1928 (1). – P. 012033.

## АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

*В. Н. Сидоров<sup>1</sup>, Д. О. Климушкин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия,  
e-mail: sidorov.vladimir@gmail.com*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия,  
e-mail: d.o.klimushkin@gmail.com*

### Реферат

В данной статье в рамках метода конечных элементов предлагается алгоритм, построенный для анализа устойчивости стержневых механических систем под действием динамических нагрузок. Учтены воздействия узловых изгибающих моментов и поперечных сил на общую устойчивость конечно-элементной расчетной модели.

**Ключевые слова:** устойчивость, метод конечных элементов, стержневая система, стержневой конечный элемент, динамика сооружений, устойчивость при динамическом воздействии.

### Введение

При численном решении задач расчета конструкций на динамические воздействия, формулируемых уравнением движения Д'Аламбера, это уравнение, как правило, записывается в удобном для вычислений матричном виде:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\bar{\mathbf{V}}}(t) + \mathbf{D} \cdot \dot{\bar{\mathbf{V}}}(t) + \mathbf{K} \cdot \bar{\mathbf{V}}(t) = \bar{\mathbf{F}}(t), \quad (1)$$

где  $\mathbf{K}$  – матрица жёсткости расчётной модели конструкции;

$\mathbf{D}$  – матрица демпфирования расчётной модели;

$\mathbf{M}$  – матрица масс расчётной модели;

$\bar{\mathbf{F}}(t)$  – вектор изменяющихся во времени  $t$  внешних силовых воздействий.

Решением уравнения (1) является вектор  $\bar{\mathbf{V}}(t)$ , содержащий значения перемещений узлов расчётной модели деформируемой конструкции в моменты времени  $t$ .

### Методология

При анализе устойчивости системы, выполняемом при пошаговом решении уравнения движения  $\bar{\mathbf{V}}(t)$ , для моментов времени  $t$ , условие равновесия Д'Аламбера может быть представлено в следующем виде:

$$(\mathbf{A}_{din} + \mathbf{E}) \cdot \mathbf{K} \cdot \bar{\mathbf{V}}(t) = \bar{\mathbf{F}}(t), \quad (2)$$

где  $\mathbf{A}_{din}$  – сумма диагональных матриц  $\mathbf{A}_{in}$  и  $\mathbf{A}_{damp}$ , на главных диагоналях которых находятся коэффициенты инерционных и демпфирующих усилий, вычисляемые поэлементным делением векторов внутренних инерционных  $(\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{V}})_{[i]}$  и демпфирующих  $(\mathbf{D} \cdot \dot{\mathbf{V}})_{[i]}$  сил на вектор упругих сил  $(\mathbf{K} \cdot \bar{\mathbf{V}})_{[i]}$ :

$$\mathbf{A}_{in} = (\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{V}})_{[i]} : (\mathbf{K} \cdot \bar{\mathbf{V}})_{[i]} = (\bar{\mathbf{S}}_{in})_{[i]} : (\bar{\mathbf{S}}_{el})_{[i]},$$

$$\mathbf{A}_{damp} = (\mathbf{D} \cdot \dot{\mathbf{V}})_{[i]} : (\mathbf{K} \cdot \bar{\mathbf{V}})_{[i]} = (\bar{\mathbf{S}}_{damp})_{[i]} : (\bar{\mathbf{S}}_{el})_{[i]},$$

где знак «:» означает поэлементное деление векторов.

$\mathbf{E}$  – единичная матрица.

Таким образом, уравнения (1) и (2) равнозначны между собой.

Матричная запись обобщенной проблемы собственных значений, к которой сводится каноническое уравнение устойчивости механической системы под действием упругих (потенциальных) сил, имеет вид:

$$\mathbf{K} \cdot \Phi = \mathbf{K}^G \cdot \Phi \cdot \Lambda, \quad (3)$$

где  $\Lambda$  – диагональная матрица критических значений внешней нагрузки, вызывающих потерю устойчивости системы;

$\Phi$  – матрица, чьи колонки численно моделируют формы потери устойчивости системы, соответствующие критическим значениям нагрузки.

Далее алгоритм численного расчета стержневых систем на устойчивость рассмотрим в рамках алгоритма метода конечных элементов. При учете динамических (инерционных и демпфирующих) усилий формулировка (3) примет следующий вид:

$$(\mathbf{A}_{din} + \mathbf{E}) \cdot \mathbf{K} \cdot \Phi = \mathbf{K}^G \cdot \Phi \cdot \Lambda, \quad (4)$$

где  $\mathbf{K}^G$  – полная матрица геометрической жесткости расчетной модели:

$$\mathbf{K}^G = \mathbf{K}_N^G + \mathbf{K}_M^G + \mathbf{K}_Q^G, \quad (5)$$

где  $\mathbf{K}_N^G$  – стандартная матрица геометрической жесткости конечно-элементной расчетной модели [3], учитывающая продольный изгиб теряющих устойчивость стержневых конечных элементов (КЭ), т. е. только под действием продольных сил. Матрица геометрической жесткости одного ( $i$ -го)<sup>1</sup> стержневого КЭ, деформируемого в плоскости имеет вид (6) [3], [8]. Этот конечный элемент имеет по три степени свободы в каждом из двух его узлов (две поступательных и одну поворотную). При построении матрицы  $\mathbf{K}_i^G$  (6) учитывается энергия, затрачиваемая только продольной силой, и только на продольный изгиб КЭ, и не учитывается вклад в потерю устойчивости узловых изгибающих моментов и поперечных сил.

<sup>1</sup>Здесь  $i$  – номер конечного элемента в расчетной модели.

$$\mathbf{K}_i^{\Gamma} = \frac{F_i}{30 \cdot l} \cdot \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 36 & 3 \cdot l & 0 & -36 & 3 \cdot l \\ \hline 0 & 3 \cdot l & 4 \cdot l^2 & 0 & -3 \cdot l & -l^2 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & -36 & -3 \cdot l & 0 & 36 & -3 \cdot l \\ \hline 0 & 3 \cdot l & -l^2 & 0 & -3 \cdot l & 4 \cdot l^2 \\ \hline \end{array} \quad (6)$$

Суть данной матрицы никак не отличается от используемой при стандартном подходе к анализу устойчивости, за исключением того, что значения продольных усилий  $F_i$  являются суммой упругих, инерционных и диссипативных внутренних сил:

$$F_i = F_i^{el} + F_i^{damp} + F_i^{in}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{K}_M^{\Gamma}$  – матрица геометрической жесткости стержневого КЭ, реализующая вклад изгибающих моментов  $M$  в потерю устойчивости;

$\mathbf{K}_Q^{\Gamma}$  – матрица геометрической жесткости КЭ, реализующая вклад поперечных сил  $Q$  в потерю устойчивости.

Вывод матриц  $\mathbf{K}_{Mi}^{\Gamma}$  и  $\mathbf{K}_{Qi}^{\Gamma}$  для стержневого ( $i$ -го) КЭ приведен ниже.

## Результаты

### Вывод матриц геометрической жесткости вклада изгибающих моментов и поперечных сил

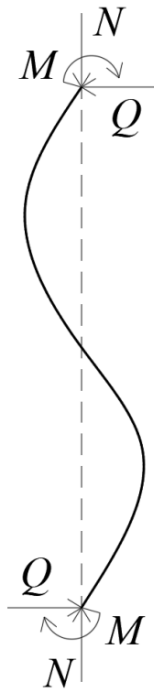
Вклад моментов и поперечных сил в потерю устойчивости стержневого КЭ определяем из условия стационарности выражения энергии  $\mathcal{E}_i$  (8), которую тратят эти силы при деформировании стержневого элемента (см. рисунок 1).

$$\mathcal{E}_i(\mathbf{v}) = \int_i \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2 \mathbf{v}}{dz^2} EJ \frac{d^2 \mathbf{v}}{dz^2} - \frac{1}{2} \cdot N_i \left( \frac{d\mathbf{v}}{dz} \right)^2 - Q_i \cdot \gamma(\mathbf{v}) - M_i \cdot \varphi(\mathbf{v}) \right) dz. \quad (8)$$

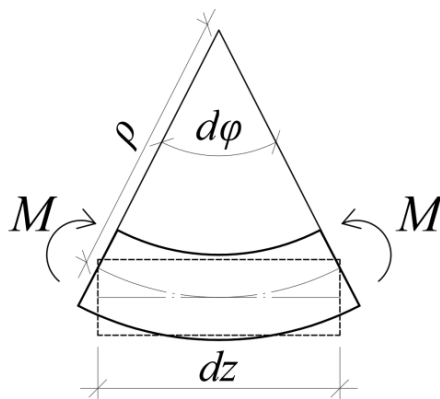
Стоит отметить, что в (8)  $N_i$ ,  $Q_i$  и  $M_i$  – внешние силы, воздействующие на стержневой КЭ через его узлы.

### Вывод матрицы геометрической жесткости КЭ при действии изгибающих моментов

Энергия, затрачиваемая изгибающим моментом  $M$  при деформировании стержня, определяется значением момента и углом искривления  $d\varphi$  вдоль оси  $Oz$  предельно малого фрагмента стержня  $dz$  (см. рисунок 2).



**Рисунок 1** – Деформированная схема стержневого КЭ



**Рисунок 2** – Деформирование предельно малого фрагмента  $dz$  стержневого КЭ под действием изгибающего момента  $M$

$$d\Pi = M \cdot d\varphi, \quad d\varphi = \frac{dz}{\rho}, \quad \frac{1}{\rho} = \vartheta \approx \frac{d^2v}{dz^2}; \quad (9)$$

$$d\Pi = M \cdot \frac{d^2v}{dz^2} dz, \quad (10)$$

где

$d\Pi$  – энергия, затрачиваемая изгибающим моментом  $M$  на изгиб фрагмента  $dz$ ;

$v(z)$  – функция прогибов КЭ;

$\vartheta(z)$  – кривизна фрагмента стержневого элемента  $dz$ .

Тогда энергия, затрачиваемая внешними изгибающими моментами при деформировании всего КЭ длиной  $l$ , составляет:

$$\Pi = \int_l M \cdot \frac{d^2 v}{dz^2} dz. \quad (11)$$

Заменим в (11) функцию прогибов  $v(z)$  её приближением  $\tilde{v}_i(\xi)$ , восполняющим узловые значения прогибов по длине КЭ. Согласно алгоритму метода конечных элементов (МКЭ) [3], функция восполнения  $\tilde{v}_i(\xi)$  изменяется внутри элемента уже по локальной нормированной ординате  $\xi$ , поэтому выполним в (11) замену переменной  $z$  на  $\xi$ :

$$z = \xi \cdot l. \quad (11a)$$

Тогда (11) примет вид:

$$\Pi = \int_0^1 M(\xi) \cdot \frac{\frac{d^2 v}{d\xi^2}}{l^2 \cdot d^2 \xi} l \cdot \frac{d\xi}{d\xi} d\xi. \quad (12)$$

Изгибающий момент в свою очередь вычисляется по формуле

$$M(\xi) = EJ \cdot \vartheta. \quad (13)$$

С учетом (13) и (9) выражение (12) принимает вид:

$$\Pi = \int_0^1 EJ \frac{\frac{d^2 v}{d\xi^2}}{l^2 \cdot d^2 \xi} \cdot \frac{d^2 v}{l^2 \cdot d^2 \xi} l \cdot \frac{d\xi}{d\xi} d\xi. \quad (14)$$

Вывод матрицы геометрической жесткости стержневого элемента при сопротивлении изгибающим моментам  $\mathbf{K}_{Mi}^\Gamma$  становится аналогичным построению матрицы жесткости стержневого элемента модели Бернулли – Эйлера [3], с тем отличием, что изгибающие моменты здесь являются внешними, передающимися на КЭ через его узлы. Таким образом, матрица  $\mathbf{K}_{Mi}^\Gamma$  примет вид:

$$\mathbf{K}_{Mi}^\Gamma = \frac{4 \cdot EJ}{l^3} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 6 & 3 \cdot l & -6 & 3 \cdot l \\ \hline 3 \cdot l & 2 \cdot l^2 & -3 \cdot l & l^2 \\ \hline -6 & -3 \cdot l & 6 & -3 \cdot l \\ \hline 3 \cdot l & l^2 & -3 \cdot l & 2 \cdot l^2 \\ \hline \end{array} \quad (15)$$

В (15) опущены нулевые строки и столбцы (с номерами 1 и 4), соответствующие степеням свободы двух узлов стержневого КЭ, направленных вдоль его оси.

### Вывод матрицы геометрической жесткости КЭ при действии поперечных сил

Энергия, затрачиваемая поперечной силой  $Q$  при деформировании предельно малого фрагмента стержня  $dz$ , определяется значением силы и углом сдвига  $\gamma$ :

$$d\Pi = Q \cdot \gamma \cdot dz, \quad \gamma = \frac{\alpha}{GA} Q, \quad (16)$$

$$d\Pi = \frac{\alpha}{GA} \cdot Q \cdot Q \cdot dz, \quad (17)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий форму поперечного сечения КЭ [1].

Тогда энергия, затраченная внешними поперечными силами по всему КЭ, составит

$$\Pi = \int_l \frac{\alpha}{GA} \cdot Q \cdot Q \cdot dz. \quad (18)$$

По аналогии с уже проделанной нами операцией выше заменим в (18) функцию прогибов  $v(z)$  её приближением  $\tilde{v}_i(\xi)$  с заменой переменной (11а).

Тогда (18) примет вид

$$\Pi = \int_0^1 \frac{\alpha}{GA} \cdot \tilde{Q}(\xi) \cdot \tilde{Q}(\xi) \cdot l \cdot \frac{d\xi}{d\xi} \cdot d\xi. \quad (19)$$

Допуская, что поперечная сила изменяется от узла к узлу вдоль КЭ по линейному закону, применяем к ее восполнению линейную функцию формы:

$$\tilde{Q}(\xi) = [N_1] \cdot \bar{Q}_i; \quad (20)$$

$$\tilde{Q}(\xi) = \begin{bmatrix} 1-\xi & \xi \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Q_l \\ Q_n \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Поперечные силы для левого и правого узла КЭ определяются скалярным перемножением 2-й и 5-й строк матрицы жесткости конечного элемента на вектор его узловых перемещений:

$$\begin{pmatrix} Q_l \\ Q_n \end{pmatrix} = \mathbf{K}_{c\delta\epsilon}^6 \cdot \bar{v}_i^6, \quad (22)$$

где  $\mathbf{K}_{c\delta\epsilon}^6$  – матрица жесткости КЭ, в которой все строки кроме 2-й и 5-й нулевые.

$$\mathbf{K}_{c\delta\epsilon}^6 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 0 & \frac{12 \cdot EJ}{l^3} & \frac{6 \cdot EJ}{l^2} & 0 & -\frac{12 \cdot EJ}{l^3} & \frac{6 \cdot EJ}{l^2} \\ \hline 0 & -\frac{12 \cdot EJ}{l^3} & -\frac{6 \cdot EJ}{l^2} & 0 & \frac{12 \cdot EJ}{l^3} & -\frac{6 \cdot EJ}{l^2} \\ \hline \end{array} \quad (23)$$

Опустим далее для удобства нулевые столбцы матрицы  $\mathbf{K}_{c\delta\epsilon}^6$  (23). Получим (23а) [3].

$$\mathbf{K}_{c\partial\partial}^e = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \frac{12 \cdot EJ}{l^3} & \frac{6 \cdot EJ}{l^2} & -\frac{12 \cdot EJ}{l^3} & \frac{6 \cdot EJ}{l^2} \\ \hline -\frac{12 \cdot EJ}{l^3} & -\frac{6 \cdot EJ}{l^2} & \frac{12 \cdot EJ}{l^3} & -\frac{6 \cdot EJ}{l^2} \\ \hline \end{array} \quad (23a)$$

$$\bar{\mathbf{v}}_i^e = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_0 \\ \mathbf{v}_0 \\ \varphi_0 \\ \mathbf{u}_l \\ \mathbf{v}_l \\ \varphi_l \end{pmatrix} \cdot \quad (24)$$

Соответственно исключим 1-ю и 4-ю строки и в векторе  $\bar{\mathbf{v}}_i^e$  (24a).

$$\bar{\mathbf{v}}_i^e = \begin{pmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \varphi_0 \\ \mathbf{v}_l \\ \varphi_l \end{pmatrix} \quad (24a)$$

$$\tilde{Q}(\xi) = \frac{6 \cdot EJ}{l^3} \begin{array}{|c|c|} \hline 1-\xi & \xi \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 2 & l & -2 & l \\ \hline -2 & -l & 2 & -l \\ \hline \end{array} \cdot \bar{\mathbf{v}}_i^e \quad (25)$$

или

$$\tilde{Q}(\xi) = \frac{6 \cdot EJ}{l^3} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & L_Q & & \\ \hline 2-4 \cdot \xi & l-2 \cdot l \cdot \xi & -2+4 \cdot \xi & l-2 \cdot \xi \cdot l \\ \hline \end{array} \cdot \bar{\mathbf{v}}_i^e \quad (26)$$

Для дальнейшего упрощения формул введем параметр сдвиговой жесткости стержневого КЭ  $k_Q$ :

$$k_Q = \frac{\alpha \cdot 6 \cdot EJ}{l^3 \cdot GA} = \frac{12 \cdot \alpha \cdot (1+\nu)}{l^3} \cdot \frac{J}{A}, \quad (27)$$

$$\Pi = \int_0^1 \frac{6 \cdot EJ}{l^3} \cdot L_Q \cdot \bar{\mathbf{v}}_i^e \cdot k_Q \cdot L_Q \cdot \bar{\mathbf{v}}_i^e \cdot l \cdot \frac{d\xi}{d\xi} d\xi. \quad (28)$$

При постоянных размерах поперечного сечения и жесткости материала по длине стержня мы можем вынести параметры, описывающие жесткостные характеристики стержневого элемента за знак интеграла:

$$\Pi = \frac{6 \cdot EJ}{l^3} \cdot k_Q \int_0^1 L_Q \cdot \bar{\mathbf{v}}_i^e \cdot L_Q \cdot \bar{\mathbf{v}}_i^e \cdot l \cdot d\xi \quad (29)$$

или

$$\Pi = k \int_0^1 L_Q \cdot \bar{v}_i^e \cdot L_Q \cdot \bar{v}_i^e \cdot l \cdot d\xi, \quad (29a)$$

где  $k = \frac{6 \cdot EJ}{l^3} \cdot k_Q$ . (30)

Тогда матрица геометрической жесткости для поперечных сил будет формироваться следующим образом:

$$K_{Qi}^\Gamma = k \int_0^1 L_Q^T \cdot L_Q \cdot l \cdot d\xi; \quad (31)$$

$$K_{Qi}^\Gamma = k \int_0^1 \begin{matrix} L_Q^T \\ \hline 2-4 \cdot \xi \\ \hline l-2 \cdot l \cdot \xi \\ \hline -2+4 \cdot \xi \\ \hline l-2 \cdot l \cdot \xi \end{matrix} \times \begin{matrix} L_Q \\ \hline 2-4 \cdot \xi & l-2 \cdot l \cdot \xi & -2+4 \cdot \xi & l-2 \cdot l \cdot \xi \end{matrix} \cdot l \cdot d\xi. \quad (32)$$

В результате интегрирования произведения векторов  $L_Q^T$  и  $L_Q$  в (32) с участием  $k$  получим матрицу геометрической жесткости для поперечных сил:

$$K_{Qi}^\Gamma = \frac{24 \cdot \alpha \cdot EJ^2}{l^5 \cdot A} \begin{matrix} \begin{matrix} 4 & 2 \cdot l & -4 & 2 \cdot l \\ \hline 2 \cdot l & l^2 & -2 \cdot l & l^2 \\ \hline -4 & -2 \cdot l & 4 & -2 \cdot l \\ \hline 2 \cdot l & l^2 & -2 \cdot l & l^2 \end{matrix} \end{matrix}. \quad (33)$$

### Заключение

Теперь мы имеем все исходные матрицы, построенные для стержневого КЭ, чтобы в соответствии с алгоритмом метода конечных элементов сформировать глобальные матрицы всей расчетной модели, участвующие в модифицированной формулировке проблемы собственных значений:

$$(\mathbf{A}_{din} + \mathbf{E}) \cdot \mathbf{K} \cdot \Phi = \mathbf{K}^r \cdot \Phi \cdot \Lambda; \quad (34)$$

$$(\mathbf{A}_{in} + \mathbf{A}_{damp} + \mathbf{E}) \cdot \mathbf{K} \cdot \Phi = (\mathbf{K}_N^r + \mathbf{K}_M^r + \mathbf{K}_Q^r) \cdot \Phi \cdot \Lambda. \quad (34a)$$

Постановка задачи устойчивости (4а) дает возможность, в том числе, численно исследовать влияние диссипативных сил на устойчивость равновесия механических систем на основе теорем, обоснованных лордом Кельвином [5].

### Обсуждение

Следует отметить, что участие в (4), (4а) параметра  $\mathbf{A}_{din}$  и матриц, учитывающих вклад узловых моментов и поперечных сил ( $\mathbf{K}_M^r$  и  $\mathbf{K}_Q^r$ ), не взаимосвязаны между собой. Другими словами, динамический характер нагрузки, моделируемый параметром  $\mathbf{A}_{din}$ , можно задавать и без учета вклада узловых изгибающих моментов и поперечных сил в потерю устойчивости стержневых элементов. И наоборот, матрицы вклада узловых изгибающих моментов и поперечных сил возможно использовать для анализа устойчивости механических систем и под действием только статических нагрузок (при отсутствии инерционных и диссипативных сил).

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-11-00140).*

### Список использованных источников

1. Тимошенко, С. П. Механика материалов / С. П. Тимошенко, Дж. Гере. – М. : Мир. 1976. – 669 с.
2. Bathe, K. J. Numerical methods in finite element analysis / K. J. Bathe, E. L. Wilson. – Saddle River : Prentice-Hall Inc., 1976.
3. Сидоров, В. Н. Метод конечных элементов в задачах устойчивости и колебаний стержневых конструкций. Примеры расчётов в Mathcad и MATLAB. Учебное пособие / В. Н. Сидоров, Е. С. Бадьина. – М. : Издательство АСВ, 2021. – 173 с.
4. Сидоров, В. Н. Модификация функции диссипации Рэлея для численного моделирования внутреннего демпфирования в стержневых конструкциях / В. Н. Сидоров, Е. С. Бадьина, Д. О. Климушкин // Вестник МГСУ. – Т. 19, № 6. – 2024. – С. 960–970.
5. Алфутов, Н. А. Устойчивость движения и равновесия / Н. А. Алфутов, К. С. Колесников. – М. : Издательство МГТУ имени Н.Э.Баумана, 2003. – 255 с.
6. Золотов, А. Б. Практические методы расчета строительных конструкций. Численно-аналитические методы / А. Б. Золотов, П. А. Акимов. – М. : Издательство АСВ, 2006.
7. Строительная механика: Статика упругих систем : учебник для вузов / В. Д. Потапов, А. В. Александров, С. Б. Косицын, Д. Б. Долотказин. – М. : Высшая школа, 2007. – 511 с.
8. Гайджуров, П. П. Расчет стержневых систем на устойчивость и колебания / П. П. Гайджуров. – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2009.
9. Сидоров, В. Н. Соппротивление материалов / В. Н. Сидоров. – М. : Издательство «Архитектура-С», 2013.
10. Иванченко, И. И. Динамика мостов. Высокоскоростные подвижные, аэродинамические и сейсмические нагрузки / И. И. Иванченко. – М. : Наука, 2021. – 528 с.

## РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРЕДПРИЯТИЯ МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ПРИМЕРЕ ПИНСКОГО ФИЛИАЛА ОАО «САВУШКИН ПРОДУКТ»

*Е. А. Урецкий<sup>1</sup>, В. В. Мороз<sup>2</sup>, И. В. Николенко<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Корпорация Hoffland Environmental Inc. (USA) 10391 Silver Springs Road  
Conroe, TX 77303. Environmental technology and equipment,  
e-mail: euretsky@yandex.by*

<sup>2</sup> *УО «Брестский государственный технический университет», Брест,  
Беларусь, e-mail: vovavall@mail.ru*

<sup>3</sup> *Институт биохимических технологий, экологии и фармации, Республика  
Крым, Симферополь, ул. Киевская, 181, e-mail: nikoshi@mail.ru*

### **Реферат**

Проведено детальное обследование образующих сточные воды производств и существующих локальных очистных сооружений промышленных сточных вод Пинского филиала ОАО «Савушкин продукт». По результатам обследования разработаны мероприятия по совершенствованию образующих сточные воды производств по направлению уменьшения потребления воды на технологические нужды и выноса токсичных ингредиентов со сточными водами.

Совместно с фирмой HYDROMATIC GmbH (Германия) [1] разработана ресурсосберегающая технология очистки сточных вод этого предприятия с высокоэффективным аппаратным оформлением.

**Ключевые слова:** рН, ХПК, БПК<sub>5</sub>, реагенты, осадок, биогаз.

### **Введение**

Сточные воды предприятий молочной промышленности относятся к категории высококонцентрированных по органическим загрязнениям [1–5].

Они, как правило, содержат большое количество органических загрязнений – белки, жиры, углеводы, а также загрязнения от мытья тары, оборудования и пола. При этом концентрация лимитированных ингредиентов в сточных водах предприятий молочной промышленности в пять раз и более превышает загрязнения бытовых сточных вод.

Острая необходимость в строительстве локальных очистных сооружений связано и с тем, что настоящее время продвижение продукции Республики Беларусь на рынки дальнего зарубежья возможно только при выпуске продукции с благополучной экологической ситуацией на предприятии. Это требование оговаривают ИСО 9001 и ИСО 1401.

### **Цель статьи**

Обследование производства молочной продукции Пинского филиала ОАО «Савушкин продукт» и на основании результатов совместно с фирмой

HYDROMATIC GmbH (Германия) [1] разработать рекомендации для создания ресурсосберегающей технологии очистки сточных вод молочного производства.

### 1 Общая характеристика и обследование водного хозяйства предприятия

Общее водопотребление на ОАО «Савушкин продукт» ПФ в г. Пинске за последние годы составило 267840 м<sup>3</sup>/год. Объединенный хозяйственно-питьевой и производственный водопровод предприятия присоединен к городскому водопроводу в двух точках.

В процессе обследования производств, образующих сточные воды, с проведением совместно с химико-технологической лабораторией предприятия соответствующих анализов было установлено, что на предприятии имеет место превышения ПДК на выпусках в городскую хозяйственно-бытовую канализацию (см. таблицу 1).

**Таблица 1** – Средние значения состава сточных вод на выпуске в городскую хозяйственно-бытовую канализацию

Наименование загрязнения	Ед. изм.	Результаты исследований				ПДК
		Последние результаты УП «Пинскводоканал»				
		1	2	3	4	
<i>Взвешенные вещества</i>	<i>мг/дм<sup>3</sup></i>		151			до 500
<i>БПК<sub>5</sub></i>	<i>мгО<sub>2</sub>/дм</i>	860	550	800	390	до 400
<i>pH</i>		7,6	7,5	11,9	9,7	6,5-8,5
<i>ХПК</i>	<i>мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup></i>			1638		до 1000
<i>Жиры</i>	<i>мг/дм<sup>3</sup></i>			49		до 50
<i>Сухой остаток</i>	<i>мг/дм<sup>3</sup></i>	1666	999	3428	999	до 1000
<i>Хлориды</i>	<i>мг/дм<sup>3</sup></i>		99			до 300
<i>Сульфаты</i>	<i>мг/дм<sup>3</sup></i>		66			до 100
<i>Фосфаты</i>	<i>мг/дм<sup>3</sup></i>	11,5	6,1	47,2	8,9	до 4,5
<i>Азот аммонийный</i>	<i>мг N/дм<sup>3</sup></i>		4,7			до 35
<i>СПАВ(анион.)</i>	<i>мг/дм<sup>3</sup></i>		0,7			до 2
<i>Железо</i>	<i>мг/дм<sup>3</sup></i>		2,3			до 3
<i>Нефтепродукты</i>	<i>мг/дм<sup>3</sup></i>		1,0			до 1,0

### 2 Разработка технологии очистки сточных вод производства молочных продуктов

В соответствии с заданием, на проектируемые очистные сооружения поступают производственные сточные воды и кислая сыворотка. Общая производительность очистных сооружений составляет 350 м<sup>3</sup>/сут. Характеристика исходных сточных вод приведена в таблице № 1.

Предлагаемая авторами статьи технологическая схема очистных сооружений предусматривает следующие основные стадии обработки сточных вод.

**Механическая очистка.** Сточные воды от производственных цехов и административно-бытового корпуса поступают на существующую КНС, откуда насосами и подаются на барабанную решетку Rotomat.

Барабанное сито Rotomat, с прозорами 1,0 мм предназначено для задержания твердых отходов, взвешенных веществ размерами более 1,0 мм.

Механически очищенные сточные воды поступают в резервуар-усреднитель. В резервуаре сточные воды усредняются по расходу и концентрации. Усредненные сточные воды равномерно подаются погружными насосами на физико-химическую очистку.

**Физико-химическая очистка.** Физико-химическая очистка сточных вод включает в себя специализированное технологическое оборудование (флотаторы, шламосборник, шламонакопитель оборудование по приготовлению, дозированию реагентов (флокулянт, коагулянт, известковое молоко).

Принятая флотационная установка обеспечивает:

1. Глубокое насыщение чистой или сточной воды воздухом.
2. Формирование оптимального спектра воздушных пузырьков.
3. Отложение газовых пузырьков на твердых частицах.
4. Удаления из воды гидрофобных загрязнений: масел, нефтепродуктов, некоторых эмульгированных жидкостей, полимеров.

Кроме этого, флотатор обеспечивает удаление взвешенных веществ, в том числе в тонкодисперсном состоянии, ПАВы и ряда других загрязнений. Образующаяся пена механически удаляется в шламосборник, откуда насосом перекачивается в шламонакопитель.

Сточные воды, очищенные на флотаторе, химический состав которых близок к хозяйственно-бытовым сточным водам, направляются на ступень биологической очистки.

**Биологическая очистка.** Блок биологической очистки представлен следующими сооружениями: денитрификатор, аэротенк-нитрификатор двухступенчатый, вторичный отстойник. Сточная вода последовательно проходит сооружения биологической очистки.

В основе биологической очистки сточных вод использована SB-технология [1], которая позволяет получить ряд преимуществ перед “классической” технологией очистки активным илом:

- очистка сточных вод без использования активного ила;
- стабильная очистка при пониженных температурах стоков (до +4 °С);
- стабильная окислительная мощность по нагрузке;
- сохранение окислительной способности при отсутствии электропитания до 24 часов;
- идеальный вариант для объектов с межсезонными перерывами в работе.

Отработанная биопленка оседает во вторичном отстойнике, откуда насосом перекачивается в шламонакопитель. Биологически очищенная сточная вода самотеком поступает на песчаный самопромывающийся фильтр.

**Доочистка сточных вод.** Биологически очищенная сточная вода проходит доочистку на самопромывающемся фильтре песчаном динамическом ДСТ [1].

Фильтр работает в автоматическом режиме, не требуя постоянного вмешательства обслуживающего персонала.

**Обеззараживание.** Обеззараживание очищенной сточной воды осуществляется на УФ-установках. УФ-установки обеспечивают 100 % обеззараживание сточных вод.

**Обработка осадка.** Образующиеся в результате очистки сточных вод отработанная пена от флотатора (избыточная пленка), а так же стабилизированный осадок от биогазовой установки, подаются в шламонакопитель, откуда уплотненный шлам подвергается обезвоживанию в камерном фильтр-прессе типа KF.

**Шламонакопитель.** В шламонакопителе происходит предварительное уплотнение биопленки за счёт ее оседания при неработающем смесителе. Отстоявшаяся осветлённая вода периодически отводится из верхней зоны резервуара на вход станции очистки, а загущенный шлам накапливается в его нижней части. Шламонакопитель оборудован мешалкой, насосами и датчиком уровня. Перед откачиванием шлама он подвергается интенсивному перемешиванию пропеллерным смесителем.

**Биогазовая установка.** Концепция построения биогазовой установки предусматривает замкнутый безотходный производственный цикл. В её состав входит биореактор (ферментёр), газонакопитель, усреднитель, газгольдер и факел для сжигания избыточного биогаза [1]. Установки оборудования комплектуется бигазовым турбинным генератором.

Установка предусматривает мини-ТЭС, которая состоит из двух газопоршневых установок, работающих параллельно.

**Камерный фильтр-пресс закрытого типа.** Камерный фильтр-пресс со станцией приготовления полимера предназначен для обезвоживания осадка, с образованием кека. Камерный фильтр-пресс позволяет быстро и эффективно разделять фильтрат и кек обеспечивая обезвоживание кека 65–70 % [1].

## **Выводы**

1. Проведены детальные исследования состава сточных вод стокообразующих производств, которые позволили усовершенствовать их в направлении уменьшения потребления питьевой воды на технологические нужды и выноса токсичных химикатов со сточными водами.

2. На основании проведённых исследований состава сточных вод и выполненных обследований, образующих сточные воды производств, подготовлено техническое задание на проектирование современных очистных сооружений обработки сточных вод молочного производства.

3. На стадии биологической очистки сточных вод применена высокоэффективная SB-технология, которая реализуется без использования активного ила. Она позволяет стабилизировать очистку при пониженных температурах сточных вод (до +4 °С), сохранить окислительную способность при отсутствии электропитания до 24 часов.

4. Совместной с фирмой HYDROMATIC GmbH (Германия) авторами статьи разработана высокоэффективная технология очистки сточных вод производства молочных продуктов для Пинского филиала ОАО «Савушкин продукт», обеспечивающая гарантированную очистку сточных вод до уровня требований, установленных контролирующими организациями г. Пинска, для сброса их в городскую канализацию.

### Список использованных источников

1. HYDROMATIC GmbH (Германия).
2. Дегремон. Технический справочник по обработке воды : в 2 т. : пер. с фр. – СПб. : Новый журнал, 2007.
3. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы : пер. с англ. / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван. – М. : Мир, 2004. – 480 с.
4. Литманова, Н. Л. Совершенствование технологии локальной очистки сточных вод молокоперерабатывающих предприятий: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.04 / Наталия Леонидовна Литманова. – Санкт-Петербург, 2007. – 17 с.
5. Исследование биологической очистки сточных вод молокозаводов на модельном стоке / С. В. Степанов, О. С. Солкина, К. М. Морозова [и др.] // Технологии очистки воды «Техновод-2016»: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. – 2016. – С. 210–215.

УДК 699.841

## ТЕПЛООБРАЗОВАНИЕ В ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ СДВИГОВОГО ТИПА

*Магистрант Ш. А. Эшонхужаева*

*Научный руководитель – Е. А. Мойсейчик, д. т. н., проф. кафедры  
“Мосты и тоннели”, Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь, e-mail: mit\_ftk@bntu.by*

### Реферат

На основании анализа литературных источников показано, что стальные энергопоглощатели, использующие работу активных элементов в упругопластической и пластической стадиях работы, могут быть применены для защиты массивных мостовых сооружений. В статье предложены места расположения упругопластических стальных энергопоглощателей в пролетных мостовых конструкциях и показана их энергетическая эффективность. Экспериментально, с использованием лабораторных образцов из малоуглеродистой пластичной стали доказано, что в окрестности конструктивно-технологических дефектов (отверстия, вырезы) в растянутых и сдвигаемых элементах конструкций ЭП происходит локализация деформаций, особенно при упруго-пластической и пластической стадиях работы стали, с повышением средней температуры поверхности стали при деформировании на несколько десятков градусов (до 90 °С), что позволяет в режиме мониторинга по температурному полю активного элемента контролировать работоспособность элементов стальных пролетных сооружений мостов и энергопоглощателей.

**Ключевые слова:** сейсмостойкость, энергопоглощатели, деформации сдвига, энергоёмкость, теплообразование.

## **Введение**

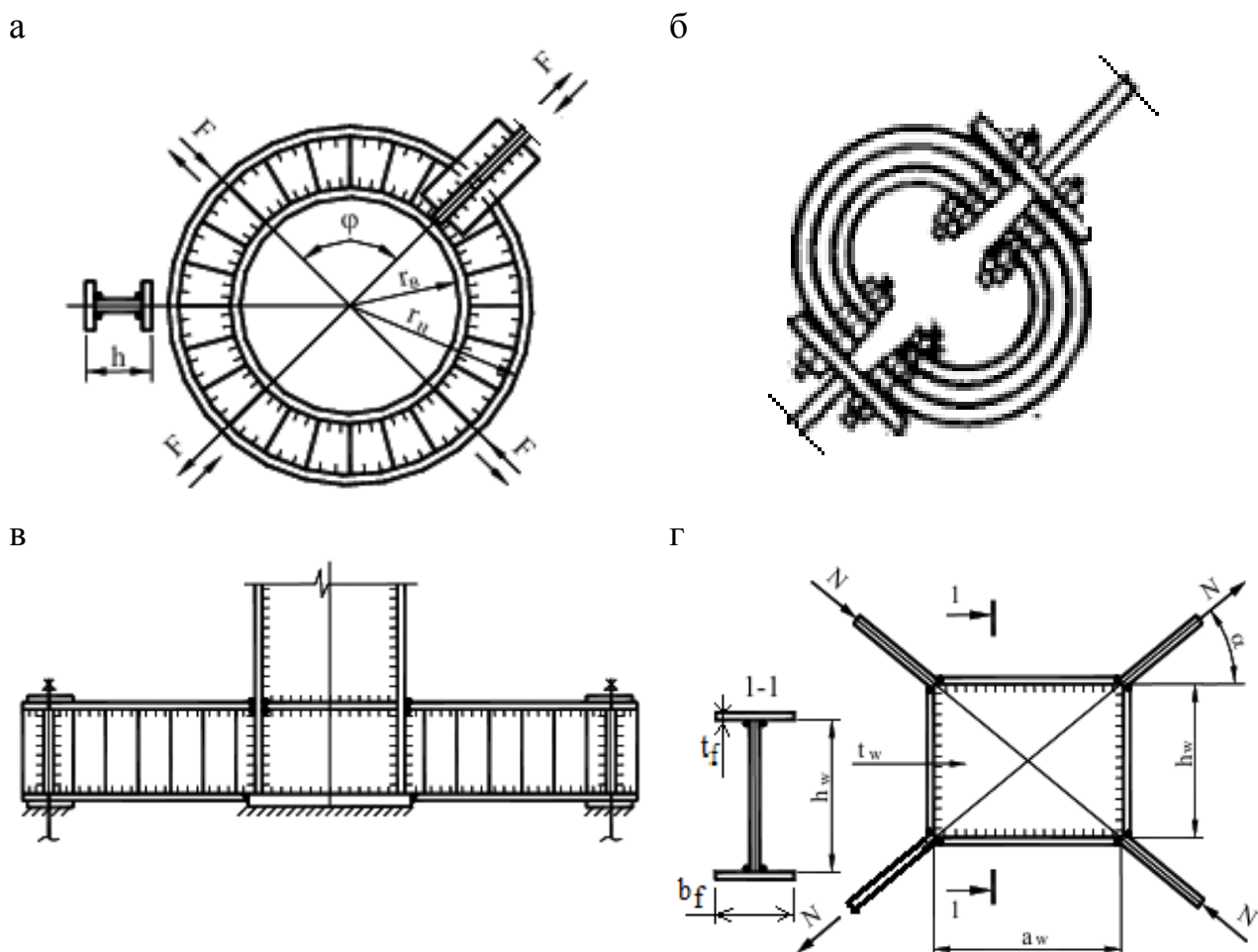
Территория Узбекистана подвержена воздействию разрушительных землетрясений, которые происходили в глубокой древности и возникали относительно недавно [1]. Землетрясения интенсивностью более семи баллов приводили к заметным нарушениям работоспособности искусственных сооружений на железных и автомобильных дорогах. Особенно это проявляется для массивных конструкций, на элементы которых действуют большие инерционные силы при сейсмических воздействиях. Повреждения опор, железобетонных и сталежелезобетонных балок мостов возникают, в основном, в опорных и пролетных строениях и проявляются в трещинообразовании, смещениях, осадках и разрушении опор; разрушении опорных частей пролетных строений, смещении и падении пролетных строений, разрушении соединительных элементов и др. [2]. Повышения устойчивости положения пролетных строений мостовых конструкций при землетрясениях достигают устройством различных ограничителей перемещений вдоль и поперек осей сооружения, специальных антисейсмических устройств, не допускающих раскрытия деформационных швов и др. [2]. Снижения названных повреждений можно достичь установкой демпфирующих устройств в сопряжениях между опорами мостов и пролетными балками. Демпферы поглощают энергию сейсмических ударов, снижают передающиеся на пролетные конструкции сейсмические ускорения [4–9]. Такие энергопоглощающие устройства разработаны для сооружений различной массы [5, 6]. Сейсмопоглотители, активные элементы которых выполнены из пластичной стали, используют работу материала в упруго-пластической и пластической стадии и надежно обеспечивают работоспособность массивных зданий и сооружений (многоэтажные жилые и производственные здания, различные сооружения) [6, 7]. Энергопоглощающие элементы в зданиях и сооружениях в каждом полупериоде колебаний преобразуют механическую энергию землетрясения, передающуюся на строительные конструкции, в другие виды энергии (в основном, тепловую) и предотвращают разрушения основных несущих конструкций при возможных пиковых перегрузках во время землетрясений. Поглощенная энергия преобразуется в тепловую и отводится в окружающую среду. Температура стальных активных элементов, преобразующих механическую энергию в тепловую, достигает 120–150 °С [9].

Энергопоглотители этого типа могут быть применены для защиты массивных мостовых сооружений. В настоящей статье рассмотрим схемы применения упругопластических стальных энергопоглотителей в пролетных мостовых конструкциях и их энергетическую эффективность.

## **Основная часть**

Классификацию энергопоглотителей (далее – ЭП) производят исходя из физических принципов работы сейсмозащиты сооружений, конструктивных особенностей поглотителей сейсмической энергии, материала и стадии его деформирования, сопряжения энергопоглотителей с защищаемым сооружением и др. [5]. В качестве активных поглотителей энергии используются демпферы различных принципов действия, адаптивные системы, системы с гасителями колебаний, сейсмические экраны, завесы и др.

Простыми по конструкции, надежными в работе и обладающими высокими демпфирующими свойствами являются поглотители сейсмической энергии, принцип действия которых основан на повторно-переменном упругопластическом деформировании низкоуглеродистой стали (рисунок 1). Их эффективность доказана более чем полувековой надежной работой многоэтажных зданий и промышленных сооружений с ЭП в Казахстане, других государствах Средней Азии [5, 6]. Такие ЭП приспособлены для изготовления на заводах металлических, в т. ч. мостовых конструкций.



а – кольцевой; б – трубчатый; в – балочный; г – сдвиговой  
**Рисунок 1** – Упругопластические энергопоглотители [9]

Однако в мостах, расположенных в сейсмоопасных районах, эти ЭП не применялись. Проектирование таких ЭП может выполняться по действующим нормам Республики Казахстан [9, 10].

Основные типы упругопластических ЭП представлены на рисунке 2.

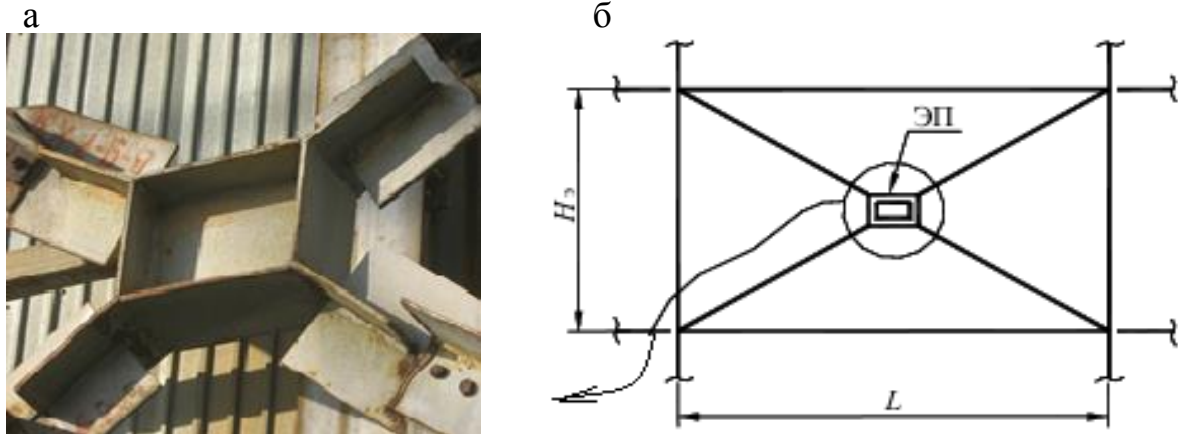
Рассмотрим особенности проектирования ЭП сдвигового типа (далее – ЭПС) [6]. Активным элементом ЭПС, воспринимающим и преобразующим сейсмическую энергию, является стенка. Ее требуемая площадь поперечного сечения определяется из условий работы на сдвиг:

$$A_w = \frac{T_w}{0,5\sigma_{\text{ты}}}, \quad (1)$$

где  $T_w = 2N\cos\alpha - \frac{\sigma_{\text{ты}}b_f t_f^2}{h_w}$  – усилие, сдвигающее стенку ЭПС вдоль горизонтальной оси;

$N$  – усилие, действующее на ЭПС (рисунок 2г);

$\sigma_{\text{ты}} = 1,4R_y$ ,  $R_y$  – расчетное сопротивление стали.



**Рисунок 2** – Вид энергопоглотителя сдвигового типа, установленного в связевую систему многоэтажного здания [9]

Окончательно толщину стенки назначают из условия обеспечения ее местной устойчивости не менее  $1/30 h_w$ .

Толщину  $t_f$  каждой из четырех пластин, передающих сдвиговые усилия на активный элемент толщиной  $t_w$ , назначают из условия прочности:

$$t_f = N\cos\alpha / (b_f \cdot 0,8\sigma_{\text{ты}}), \quad (2)$$

где  $0,8$  – коэффициент условий работы.

Эффективность поглощения энергии землетрясений ЭП, работающих в упругопластической стадии на переменные нагрузки от землетрясений. Опыт эксплуатации многоэтажных зданий со стальным каркасом в сейсмоопасных районах показал, что за период эксплуатации они воспринимают около 80 циклов знакопеременных сейсмических нагрузок [6]. Сравнить энергоемкость различных ЭП при знакопеременных нагрузках можно по удельной энергопоглощающей способности  $W_{\text{ц}}$ . В качестве критерия Г. М. Остриковым предложено рассматривать поглощающую способность единицы массы активного элемента ЭП, «определенную при одинаковом уровне максимальных относительных деформаций материала за пределом упругости» и отнесенную к одному циклу переменной нагрузки [6].

Поглощенная при пластическом деформировании активного элемента удельная энергия  $W_{\text{ц}}$  определяется работой внутренних напряжений на соответствующих пластических деформациях. В работе [6] предложены формулы для

расчета удельной энергии  $W_{ц}$ , поглощаемой активным пластинчатым элементом ЭП за один цикл жесткого нагружения при его работе:

– на растяжение 
$$W_{цр} \approx 2\sigma_{\text{ту}}^2(e - 1)/E\gamma; \quad (3)$$

– на изгиб 
$$W_{цр} \approx 1,15\sigma_{\text{ту}}^2(e - 1)^2/eE\gamma; \quad (4)$$

– сдвиг 
$$W_{цр} \approx 1,73\sigma_{\text{ту}}^2(e - 1)/E\gamma, \quad (5)$$

где  $e = \varepsilon/\varepsilon_{\text{т}}$  – уровень пластического деформирования;  $\gamma$  – угол сдвига.

При выводе формул предполагалось, что активные элементы ЭП не содержат концентраторов деформаций, а пластические деформации определяются условием пластичности Генки-Мизеса.

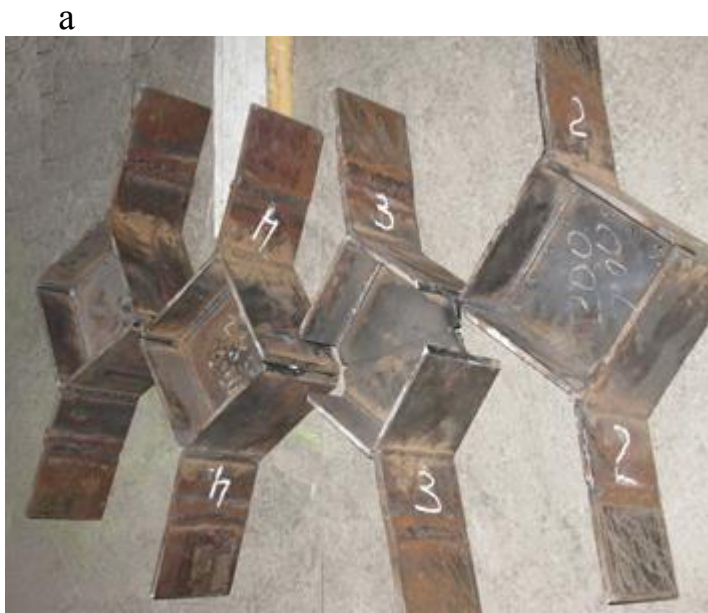
Из зависимостей (3) – (5) следует, что наибольшей удельной энергоемкостью обладают активные элементы ЭП, выполненные из пластичных сталей ВСтЗсп5, 09Г2С и подверженные в процессе работы деформациям растяжения-сжатия и сдвига. Применение их в мостовых конструкциях для повышения сейсмостойкости пролетных строений мостов и зон их сопряжений с опорами требует соответствующей доработки конструктивных форм ЭП и дополнительных исследований их работы.

Поля температур поверхности образцов ЭПС. Общие виды образцов ЭПС показаны на рисунке 3а. Размеры образцов – 220 × 220 мм, толщина листов – 10 мм. Материал – ВСтЗпсб. Нагружение производилось в испытательной машине Р-100 с записью диаграммы «нагрузка – удлинение» квазистатически, растягивающим усилием до разрушения. Испытания и обработка данных выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 1497. Процесс деформирования образцов отображался в термофильмах с помощью компьютерного термографа «ИРТИС-2000», а обработка результатов велась программным пакетом IRTIS.

Машинные диаграммы деформирования образцов ЭПС представлены на рисунке 4. Кадры термофильма образца без конструктивных дефектов в стенке приведены на рисунке 5, из которого следует, что температурное поле в упругой стадии работы материала стенки равномерное, без аномалий. Также нет аномалий при работе материала стенки в пластической стадии. В стадии самоупрочнения металла неоднородность появляется при образовании волны в стенке (рисунок 3б).

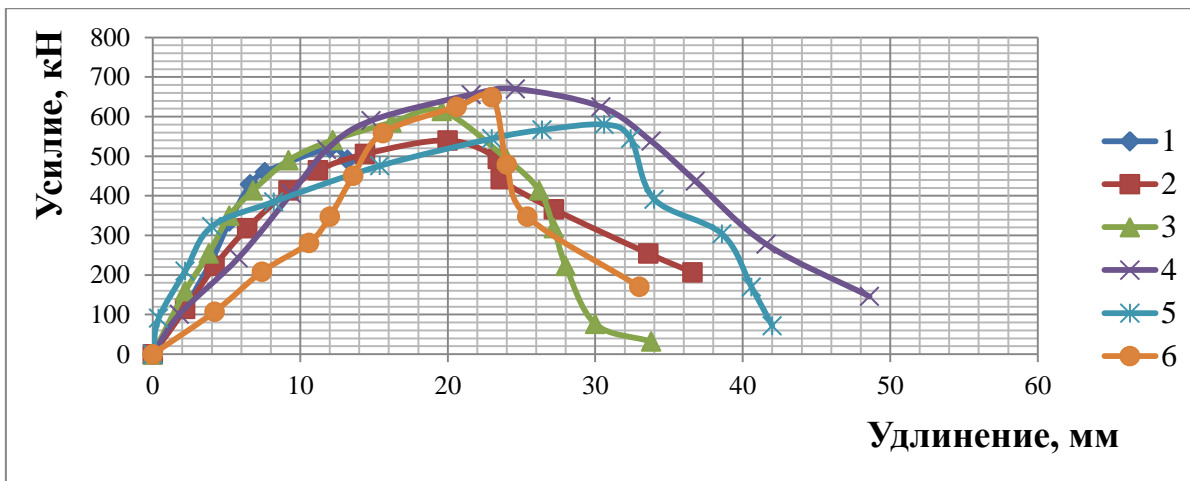
В образцах с конструктивными дефектами (отверстия, вырезы) температурные аномалии проявляются при переходе от упругой работы стали к упруго-пластической и сопровождаются непрерывным ростом температуры в месте зарождения и развития трещины.

Возможное расположение ЭП в мостовых балочных сооружениях. Предполагаем, что устои моста и промежуточные опоры выполнены в соответствии с требованиями норм проектирования сейсмостойких мостов. Тогда энергопоглотители целесообразно устанавливать в местах сопряжений пролетных строений с опорами, конструкций пролетных строений между собой.

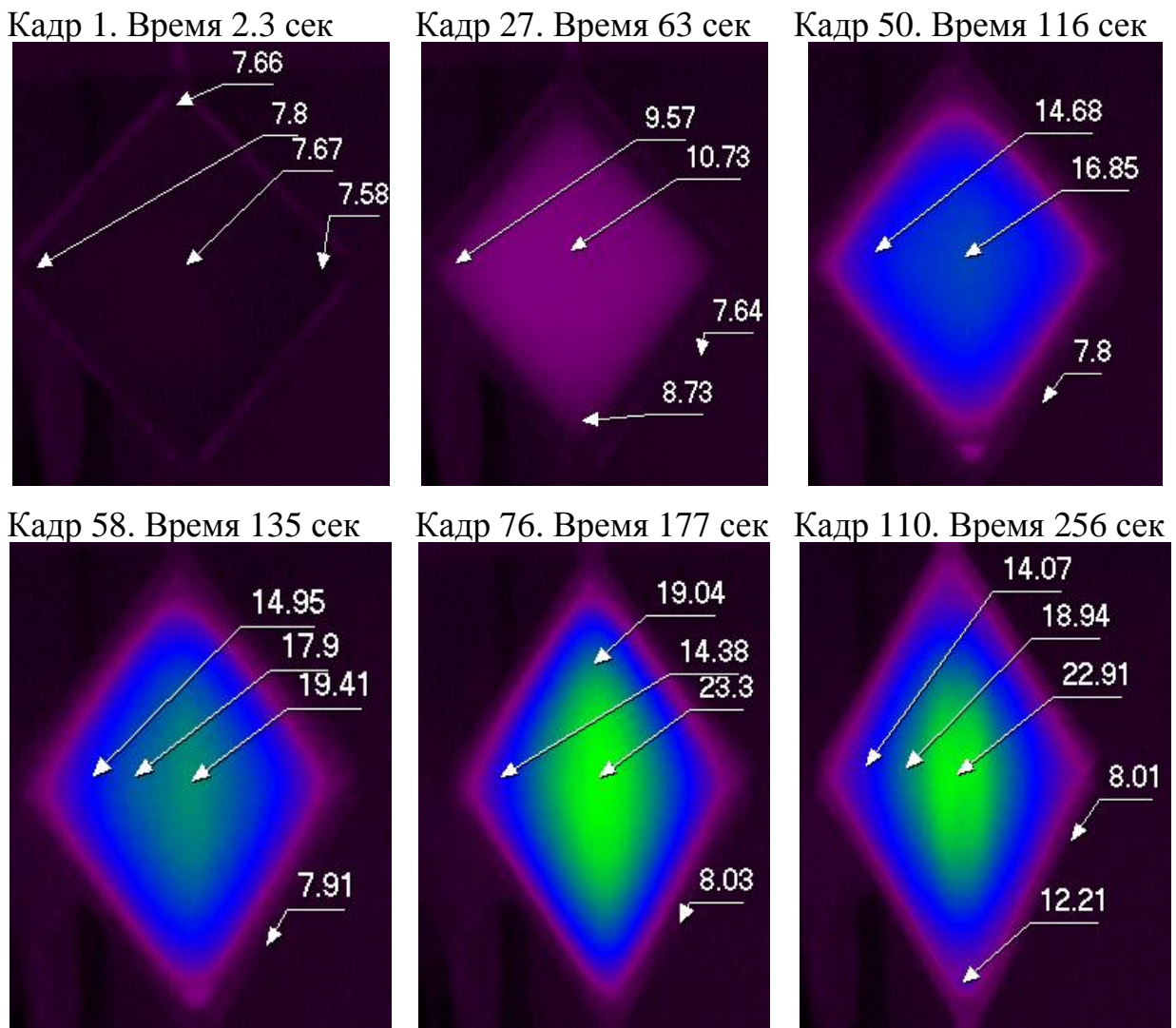


а – образцы ЭПС перед испытанием; б – вид образца типа ЭПС с активным элементом без конструктивных концентраторов; в – вид образца типа ЭПС с отверстием в середине активного элемента; г – вид образца типа ЭПС с боковыми вырезами в активном элементе

**Рисунок 3** – Экспериментальные энергопоглотители ЭПС и их вид в стадии предразрушения



**Рисунок 4** – Диаграммы «усилие – удлинение» по данным растяжения экспериментальных сдвиговых образцов с конструктивными дефектами и без них в машине Р-100



**Рисунок 5** – Кадры термофильма деформационного нагрева образца без дефектов в стенке

## **Заключение**

1. На основании опыта строительства и эксплуатации многоэтажных сейсмостойких зданий, оснащенных энергопоглотителями с активными стальными элементами, работающими в упругопластической и пластической стадиях, предложено отдельные из них (ЭПС и др.) применять для повышения сейсмостойкости пролетных строений мостов и зон их сопряжений с опорами с соответствующей доработкой конструктивных форм ЭП и дополнительными исследованиями их работы.

2. Экспериментально, с использованием лабораторных образцов из малоуглеродистой пластичной стали доказано, что в окрестности конструктивно-технологических дефектов (отверстия, вырезы) в растянутых и сдвигаемых элементах конструкций ЭП происходит локализация деформаций, особенно при упруго-пластической и пластической стадиях работы стали, с повышением средней температуры поверхности стали при деформировании на несколько десятков градусов, что позволяет в режиме мониторинга по температурному полю активного элемента контролировать работоспособность элементов стальных пролетных сооружений мостов и энергопоглотителей.

## **Список использованных источников**

1. Газлийские землетрясения 1976 г. Геолого-геофизическая природа очагов. – М. : Наука, 1984. – 200 с.
2. Шестоперов, Г. С. Сейсмостойкость мостов / Г. С. Шестоперов. – М. : Транспорт, 1984. – 143 с.
3. Гельфер, А. А. Разрушение мостовых опор и меры их защиты / А. А. Гельфер. – М. : Изд-во НКХ РСФСР. 1938 – 150 с.
4. Шермухамедов, У. З. Гашение продольных сейсмических колебаний опор балочных мостов с сейсмоизолирующими опорными частями: автореф. дисс...канд. техн. наук: 05.23.11 / У. З. Шермухамедов / ФГОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения». – М., 2010. – 21 с.
5. Мартынов, Н. В. Активная сейсмозащита: варианты развития и критический анализ практических возможностей : монография / Н. В. Мартынов. – Симферополь : [б. и.], 2013. – 267 с.
6. Остриков, Г. М. Стальные сейсмостойкие каркасы многоэтажных зданий: монография/ Г. М. Остриков, Ю. С. Максимов. – Алма-Ата : Казахстан, 1985. –120 с.
7. Строительные нормы. Пособие по расчету и конструированию стальных сейсмостойких каркасов многоэтажных зданий в развитие СНиП РК 2.03-04-2001. Часть 2. – Приняты и введены в действие МИТ РК от 03.11.2004 г. № 426 с 1 марта 2005 г. – Алматы : ТОО «Институт Проектстальконструкция», 2005. –52 с.
8. Поляков, В. С. Современные методы сейсмозащиты зданий / В. С. Поляков, Л. Ш. Килимник, А. В. Черкашин. – М. : Стройиздат, 1989. – 320 с.
9. Проектирование сейсмостойких зданий. Часть 1. Проектирование зданий из стальных конструкций. НТП РК 08-01.5-2013. – Астана, 2024. – 251 с.
10. Нормативно–техническое пособие Республики Казахстан. Проектирование стальных конструкций. Часть: стальные мосты. НТП РК-03-02.1-2012 (к СН РК EN 1993-2:2006/2011). – Астана, 2015. – 152 с.

## Содержание

**Kashiripoor M. M., Almaliki A. Y.**

Advanced Technologies Implement Such as Data Analytics and Artificial Intelligence to Enhance Decision-Making Processes in Project Management in Civil Engineering ..... 3

**Sidorov V. N., Primkulov A. M., Makarova E. A.**

Mathematical Modeling and Machine Learning Techniques in Solving the Heat Transfer Inverse Problems..... 9

**Volchak A. A., Parfomuk S. I., Sidak S. V.**

Variations of the Open Channel Minimum Runoff of the Pripyat River at the Mozyr Gauging Station: Current Status and Forecast ..... 22

**Zhuxi Yang**

The Use of Renewable Energy in Architectural Design: Taking China as an Example and Its Implications for Belarus ..... 33

**Буйновская В. В., Полоз И. И.**

Влияние экологического дизайна на устойчивое строительство ..... 38

**Волчек А. А., Наумчик Г. О., Белов В. С.**

Выбор метода получения газо-жидкостной дисперсии при введении сравнительно дорогостоящих газов ..... 44

**Волчек А. А., Образцов Л. В., Срывкина Л. Г.**

Роль предпроектной стадии в создании устойчивой среды для жизнедеятельности ..... 53

**Дордюк Ю. С., Яловая Н. П.**

Анализ диагностических параметров при обследовании технического состояния строительных конструкций ..... 56

**Евстратенко А. В.**

Методы анализа градостроительной эффективности развития общественной функции в центральной зоне крупного города ..... 63

**Каширипур М. М., Николюк В. А.**

Интеграция искусственного интеллекта в строительную индустрию..... 67

**Кравченко В. В.**

Многоуровневая модель гомогенизации жесткостных характеристик гетерогенной структуры бетонного композита ..... 76

<b>Кулак А. Ю., Гурбич Д. А.</b> Анализ жизненного цикла объектов недвижимости в Республике Беларусь .....	<b>82</b>
<b>Пойта П. С., Шалобыта Н. Н., Шалобыта Т. П.</b> Влияние мощности искусственного основания на величину осадки фунда- мента.....	<b>87</b>
<b>Пойта П. С., Шалобыта Н. Н., Клебанюк Д. Н., Кандыбо С. Н., Шведовский П. В.</b> Экспериментальные исследования развития осадок фундаментов при действии полезной нагрузки .....	<b>94</b>
<b>Романовский С. А., Бакатович А. А.</b> Теплоизоляционные материалы на основе растительных волокон .....	<b>102</b>
<b>Самуйлов Ю. Д., Батяновский Э. И.</b> Методика и пример расчета состава неавтоклавного ячеистого газобетона теп- лоизоляционного назначения на основе ультрадисперсных фракций гранитного отсева .....	<b>110</b>
<b>Самченко С. В., Трунтов Н. С., Шукшин Ф. Б.</b> Композиционные материалы с эффектом расширения на основе сульфоломини- ната кальция .....	<b>117</b>
<b>Серегин Н. Г.</b> Сооружение цементно-грунтовых свайных фундаментов.....	<b>123</b>
<b>Сидоров В. Н., Климушкин Д. О.</b> Алгоритм численного расчета стержневых систем на устойчивость при дина- мических нагрузках.....	<b>133</b>
<b>Урецкий Е. А., Мороз В. В., Николенко И. В.</b> Разработка ресурсосберегающей технологии очистки сточных вод предприя- тия молочной продукции на примере Пинского филиала ОАО «Савушкин продукт» .....	<b>142</b>
<b>Эшонхужаева Ш. А., Мойсейчик Е. А.</b> Теплообразование в энергопоглощающих элементах сдвигового типа .....	<b>146</b>

Научное издание

**СТРОИТЕЛЬСТВО – ФОРМИРОВАНИЕ СРЕДЫ  
ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

**CONSTRUCTION – THE FORMATION OF LIVING  
ENVIRONMENT**

**FORM 2025**

*Сборник статей  
XXVIII Международной научной конференции  
г. Брест, 23–25 апреля 2025 года*

**Ответственный за выпуск:** Черноиван Н.В.

**Редактор:** Винник Н.С.

**Компьютерная вёрстка:** Ковальчук Е.Н.

**Корректор:** Дударук С.А.

---

Издательство БрГТУ.

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных  
изданий № 3/1569 от 16.10.2017 г.

Подписано в печать 26.08.2025 г.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага «Performer».

Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 9,07.

Уч. изд. л. 9,75. Заказ № 777. Тираж 50 экз.

Печать цифровая. Отпечатано и изготовлено в  
типографии учреждения образования «Брестский  
государственный технический университет».

224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

ISBN 978-985-493-659-8

