

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

«Вестник Полоцкого государственного университета» продолжает традиции первого в Беларуси литературно-научного журнала «Месячник Полоцкий».

№ 1(44), 2026

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия F. Строительство. Прикладные науки

В серии F научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области геодезии, геоэкологии, экологической безопасности строительства и городского хозяйства, строительства и архитектуры.

ВЕСНИК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАЎНАГА ЎНІВЕРСИТЭТА
Серыя F. Будаўніцтва. Прыкладныя навукі

У серыі F навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваанне і змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне геадэзіі, геаэкалогіі, экалагічнай бяспекі будаўніцтва і гарадской гаспадаркі, будаўніцтва і архітэктуры.

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY
Series F. Civil engineering. Applied sciences

The F series of the scientific and theoretical journal publishes peer-reviewed articles containing new scientific results in the field of geodesy, geoecology, environmental safety of construction and urban economy, construction and architecture.

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.

Электронная версия номера размещена на сайте: <https://journals.psu.by/constructions>

Адрес редакции:
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь
тел. + 375 (214) 59 95 41, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск: *А.М. Нияковский.*
Редактор *А.А. Прайдова.*

Подписано к печати 19.05.2026. Бумага офсетная 80 г/м². Формат 60×84¹/₈. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 13,46. Тираж 7 экз. Заказ 226.

СТРОИТЕЛЬСТВО

UDC 624.011.1+624.011.2

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-2-10

WOOD AS A STRUCTURAL MATERIAL: CURRENT STATE OF THE ISSUE, PROBLEMS, PROSPECTS

*Doctor of Philosophy LIYUN ZENG¹⁾,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor A. HIL²⁾,
Doctor of Philosophy, Professor YUFENG LI³⁾
(^{1), 3)} Panzhihua University, China,
²⁾ Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)*

This document provides a systematic overview of the latest developments in the field of bendable and non-centrally compressed elements and composite elements made of wood and concrete, focusing on key topics including mechanical characteristics, molding processes, fire resistance, interfacial mechanisms and stability assessment. As a result of the analysis, it was determined that: glued wood, due to its multilayer structure, good flexibility and controlled surface behavior, has clear advantages when exposed to fire, bending and composite systems, although the stability of the surface at high temperatures and the mechanisms of prolonged aging require further study. Progress in the field of flexible wood components, driven by advances in hydrothermal softening, local compaction, material modification, and cross-sectional innovations, however, challenges remain related to molding stability and the continuity of the manufacturing process for large-sized parts. Wood–concrete composite structures exhibit excellent ductility, energy dissipation, and seismic performance, but uncertainty remains about the long-term durability of the joints and behavior under environmental conditions. In general, engineered wood materials are evolving from the study of individual properties to the development of a multiscale paradigm of “material–interface–structure–environment”. Future work should strengthen the understanding of mechanics, multiscale modeling, process industrialization, and sustainability research to create high-performance wooden structural systems.

Keywords: *wood construction, wood–concrete composite structures, sustainability, compression, bending.*

Introduction. With the advent of low-carbon construction concepts and the growing demand for renewable materials, wood has once again attracted attention in the construction industry due to its light weight, high strength-to-weight ratio, renewability, and environmental benefits. In the field of engineering wood materials, the basis of research is the determination of structural strength in compression and bending. Currently, the wooden structures are based on elements made of solid and glued wood. Composite materials made of wood and concrete are a promising area. These systems are believed to have the potential to optimize structural performance, design flexibility, integrated load response, and stability. Research in the field of wood bending has made it possible to produce wooden parts of great curvature and arbitrary shape. Structures made of wood–concrete composites combine the light weight of wood and the high compressive strength of concrete, which demonstrates practical potential in seismic exploration and floor systems. Wood processing processes determine the stability of the components in case of fire and prolonged environmental exposure. Therefore, it is important to systematically analyze the progress of research on these categories of wood components.

Methods and materials. Bendable wooden elements. In recent years, researchers have pursued material modification, process innovation, and structural optimisation to improve the bending performance and reliability of solid-wood elements.

First, material softening and enhancement of plasticity form the foundation of solid-wood bending. For precious hardwoods such as teak, which are notoriously rigid and resistant to bending, researchers have proposed an innovative

synergistic softening process. Research combining vacuum impregnation with softening solutions and saturated steam treatment significantly enhanced teak's plasticity, enabling successful bending processing [1]. This breakthrough overcomes the limitations of single-mode steam softening on hardwoods. Secondly, thermal modification – a common wood modification technique – exerts complex effects on bending properties. Kubojima, et al. [2] revealed a dual effect of heat treatment on wood toughness: in the early stage of treatment, the elastic modulus and bending strength may increase, but with prolonged treatment, the viscous and plastic components decline significantly, leading to increased brittleness and a continuous reduction in rupture work [2]. Thus, while moderate heat treatment can optimise certain mechanical indicators, excessive thermal modification severely impairs the wood's capacity for plastic deformation and undermines the toughness of bent elements – particularly under impact loading. Thirdly, enhancing density through compression densification constitutes a direct physical approach to improving mechanical properties, including bending performance. Li [3] compared different compression patterns and found that surface-compressed timber achieves the highest surface layer density, elastic modulus, and static bending modulus at equivalent overall compression ratios. For bent solid elements, this is instructive: selectively reinforcing the layer of a component that sustains the maximum bending stress most effectively increases flexural capacity and promotes material-efficient design, rather than applying uniform, whole-section compression [3].

Although Bal [4] did not directly investigate the bending process, the study demonstrated that impact bending strength exhibits a parabolic variation with span length. This underscores the critical influence of test system geometry and boundary conditions on the measurement of wood toughness [4]. When designing and testing bent solid elements, the support span encountered in service must be accounted for to ensure bending performance assessments are accurate and applicable. Node optimisation is crucial for maintaining the structural integrity of curved members. While Ribeiro AB. [5] focused on research into load-bearing timber structural joints, employing finite element modelling and parametric optimisation methods. This provides methodological guidance for node design in curved solid members. Such analysis can determine optimal mortise and tenon dimensions, minimising wood fibre cutting and damage whilst maintaining strength [5].

Consequently, research into curved solid timber members is inherently interdisciplinary—encompassing materials science, manufacturing processes, mechanics, and design. Current trends indicate that advancement in this field hinges upon: (1) innovative softening techniques to enhance wood plasticity; (2) targeted surface densification to optimise performance distribution; and (3) the application of advanced numerical tools for precise joint design. Future work should further elucidate the mechanisms underlying softening across species and develop more efficient, environmentally benign shaping and setting techniques to broaden the applications of solid-wood bending in architecture and furniture design. Presently the field faces three major challenges: (1) poor plasticity of hard species (e.g., teak) and the limited effect of traditional softening methods; (2) strength gains from heat treatment and densification often come at the cost of reduced toughness and ductility, increasing brittleness; and (3) a weak theoretical basis for node design, where stress concentrations readily trigger structural failure and systematic optimisation methods remain insufficient.

In recent years, numerous experimental and theoretical studies have focused on the flexural behavior of glued-laminated beams with varying cross-sectional geometries, species combinations, and reinforcement strategies, providing systematic evidence for their application in building structures, bridges, and long-span roofs.

Research into fundamental mechanical properties has established the theoretical basis for understanding the bending behaviour of glued laminated timber. Researchers systematically measured the material properties and flexural performance of glued laminated beams, revealing that engineered timber beams exhibit significantly higher strength and stiffness than conventional sawn timber, with strength increases ranging from 39% to 90% and stiffness improvements from 35% to 45% [6]. In terms of cross-section and structural innovation, multiple studies have highlighted the significant advantages of glued laminated timber as a bendable structural component, offering both manufacturability and plasticity [7; 8]. Some scholars demonstrate that both orthogonal and parallel T-configurations maintain high load-bearing capacity while reducing material consumption; orthogonal T-beams exhibit approximately 33% greater load-bearing capacity than rectangular beams [7]. A separate study on hollow laminated timber beams aimed to achieve weight reduction while

controlling flexural deformation. This research demonstrated that carefully designed hollow cross-sections could reduce self-weight without compromising load-bearing capacity, thereby enhancing overall component efficiency while maintaining flexural performance [9]. The selection of timber species and laminated configurations exerts a significant influence upon the bending properties and mechanical response of glued laminated timber. Comparative studies integrating analytical models, finite element analysis, and experimental data from multiple timber species demonstrate a high degree of consistency among the three methodologies – with most discrepancies falling within $\leq 5\%$ – validating the models' reliability in simulating bending behaviour [10]. This evidence supports the adaptability of glulam across diverse forestry regions and drives the development of new species for flexible timber components. Within reinforcement applications, steel plate reinforcement offers an alternative to FRP and CFRP [11]. While steel plates substantially enhance bending stiffness and load-bearing capacity, practical implementation requires balancing weight considerations against durability. Glulam exhibits predictable charring rates; strategically configured fire-retardant boards, thermal insulation layers, or thickened protective systems can substantially delay charring progression and extend fire resistance duration [12]. This research highlights the correlation between load-bearing capacity loss and effective cross-sectional reduction, proposing fire protection design methodologies based on char layer evolution patterns [12]. It provides scientific foundations for fire protection design, performance assessment, and code development in glulam structures.

Because glulam components offer high designability, controllable material properties, and flexural performance that can be markedly enhanced by section optimization and composite reinforcement, they represent one of the most promising forms within the bendable wooden elements system. Nevertheless, systematic quantification of how bending performance is affected by species-specific defects, interlayer interface behaviour, and long-term actions is still lacking; post-reinforcement interface bond-degradation mechanisms remain unclear; and stress models for hollow and complex sections are not yet complete. Future research should integrate advanced numerical modelling, interface bond characterisation, long-term performance, and fatigue studies to promote deep application of glulam in bendable members, curved beams, and large-span timber structures.

Compressed-Bendable wooden elements. Solid wood subjected to non-centrally compressed bending undergoes combined bending, localized compression, and shear. Existing studies provide relatively systematic evidence on the mechanical behavior of solid wood during compressed-bending processes.

First, the fundamental mechanical properties of wood constitute the basis for designing compressed-bending elements. Cao H. [13] systematically tested the density, moisture content, tensile, compressive, and shear strengths of engineered wood, confirming that wood exhibits linear elasticity in tension along the grain but elastoplastic behavior in compression, while its shear strength is substantially lower than its tensile and compressive strengths parallel to the grain. This implies that, in bending scenarios involving non-central compression, high shear concentrations should be avoided to prevent localized failure, which provides direct guidance for jig design and load-path planning [13]. Second, the enhancement of wood plasticity and its ability to retain permanent deformation are fundamentally controlled by its microstructural components. Zhang Y., et al. [14] noted that hemicellulose hydration, lignin thermal softening, and relative slippage between the crystalline and amorphous regions of cellulose constitute the core mechanisms governing longitudinal compression and permanent deformation (PDR). For compressed bending under noncentral loading, these micro-mechanisms determine both the magnitude of springback and the stability of the formed shape, providing the essential scientific basis for improving bending quality [14]. Third, hygrothermal conditions significantly alter the bending behavior of solid wood. Bending tests by Li and Zhao [15] demonstrated that water saturation and elevated temperature reduce MOE and MOR to approximately half of the air-dried values, while markedly increasing failure strain and toughness. This indicates that hygrothermal treatment can effectively enhance the plasticity required for compressed-bending elements, allowing larger curvatures without inducing brittle failure, thereby making it one of the most practical approaches for achieving non-centrally compressed forming [15]. In addition, the review by Wu, et al. [16] systematically compared softening methods such as boiling, steam, hot water, ammonia treatment, and microwaves, and noted that although each technique has specific advantages in improving plasticity, reducing cracking, and stabilizing the formed shape, a balance

must be struck among mechanical performance, environmental impact, and industrial feasibility. This indicates that the selection of compression bending processes should be based on a comprehensive assessment of softening mechanisms, forming quality, and process continuity. Barnes, et al. [17] provided key engineering evidence. Their short-term steam heating of specimen centres at approximately 71°C did not significantly reduce the bending strength or compressive strength perpendicular to the grain of red oak and sweet maple (typically $\leq 10\%$ reduction) [17]. It indicates that low-temperature steam can soften wood and enhance formability without substantially compromising structural performance, thereby validating its applicability for compressed-bending elements in industrial settings.

Overall, existing studies indicate that the plasticity and shape retention of solid wood under non-centrally compressed bending are jointly determined by hygrothermal conditions, microstructural changes, and intrinsic mechanical properties.

Within the research framework of compressed-bendable elements (non-centrally compressed), glued wooden elements have emerged as a crucial pathway for enhancing bendability and load-bearing performance due to their manufacturability, controllable layer configuration, and stable mechanical behavior. The mechanical properties and service reliability of such elements are jointly governed by layer composition, adhesive selection, manufacturing parameters, and the interface and charring behavior under fire conditions.

Layer configuration and adhesive performance are key factors influencing the compressive and bending capacities of glued wooden members. Experimental studies on mixed cross-laminated timber (CLT) conducted by Lee and Kim [18] show that using high-MOE species as the major layer significantly increases compressive strength, while phenol-resorcinol-formaldehyde (PRF) exhibits higher interfacial strength than the two polyurethanes, thereby reducing interface-dominated failure modes [18]. Similarly, Qian C. (2023) systematically reviewed manufacturing techniques for structural glued wood and pointed out that finger-jointing, wide-lamination, pressing parameters, moisture content, and adhesive curing behavior directly affect dimensional stability, strength uniformity, and subsequent bend-forming performance. Therefore, for compressed-bendable members, the configuration of the major load-bearing layers and the selection of thermally compatible adhesives form fundamental prerequisites [19]. Besides, numerous studies have indicated that the adhesive interface becomes a critical weak link under high-temperature or fire conditions. In CLT floor fire tests, Yang H., et al. [20] found that glue lines tended to crack first at elevated temperatures and evolve into fire-penetration paths. Consistently, Hu X., et al. [21] reported that the residual load-bearing capacity of glulam beams exposed to three-sided fire decreased markedly with prolonged exposure, and that fire-retardant treatment exerted a positive effect on interface integrity. Moreover, Zhang J., et al. [22] based on full-scale compartment fire tests coupled with a two-zone fire model, revealed the occurrence of randomized char-layer shedding during CLT combustion, which significantly alters heat release and temperature distribution and plays a crucial role in evaluating compression–bending behavior and residual strength. These findings collectively indicate that the reliability of glued wooden elements under combined compression and bending depends not only on material properties but also on the thermal stability of the adhesive interface. Furthermore, introducing densification or pre-compression techniques provides a viable route to enhancing the mechanical quality of wood substrates. Van Hai, et al. [23] demonstrated that bleaching and hot-pressing significantly improved the density, bending strength, and stiffness of compressed wood, offering higher-performance substrates for compressed-bendable glued elements. However, the permeability and interfacial compatibility of such densified materials with adhesives require further optimization to avoid insufficient bonding or brittle interfacial behavior.

In engineering practice, glued wooden components are often joined with connectors to form large-curvature or long-span elements. Wei X. and Guo W. [24] reported that although metal joints enable the assembly of curved laminated members, their in-plane and out-of-plane load-carrying capacities are lower than those of the members themselves, and they are prone to magnifying second-order effects. Thus, joint design must be incorporated into the overall stability evaluation. In addition, studies on flame-retardant film–scrimber composite systems have demonstrated synergistic effects between surface flame-retardant layers and treated cores, substantially reducing heat release rates and improving fire resistance, thereby providing safer composite strategies for indoor glued wooden elements [25].

In summary, existing research indicates that performance optimization of glued wooden elements within compressed-bendable systems should advance simultaneously across multiple dimensions, including layer configuration and adhesive selection, high-temperature interface stability, manufacturing consistency, and joint and flame-retardant composite design. These studies collectively provide essential theoretical foundations and engineering references for developing glued wooden components with greater bendability, enhanced fire resistance, and improved interfacial stability.

Wood-Concrete Elements. Wood–concrete composite elements combine the light weight and renewability of wood with the high compressive strength and durability of concrete, achieving a well-balanced compromise between structural performance and sustainability. Recent research has focused on three core issues: the mechanical behavior and seismic performance of composite material systems, interface connections and long-term durability, and numerical modeling and engineering applicability at the component and system scales.

Firstly, from the perspective of material modification and seismic performance of components, Dominguez-Santos, et al. [26] demonstrated that “wood-aggregate concrete blocks” prepared by adding wood-based additives (e.g., sawdust, wood chips) can reduce stiffness while significantly enhancing ductility when an appropriate dosage ($\leq 15\%$) is used. This improvement measure enhances the energy dissipation capacity and seismic performance of reinforced concrete frames without significantly increasing costs. Researchers further indicate that this composite concrete holds potential for engineering applications in earthquake-prone regions and contributes to resource recycling [26]. Additionally, interface connection mechanisms and long-term performance are widely regarded as “critical controlling factors” for wood–concrete composites. Push-out tests by Wang, et al. [27] revealed pronounced differences in interface failure modes, load–slip behavior, and shear stiffness between bamboo–concrete and wood–concrete connections. These findings indicate that modified analytical models or material-specific design parameters are required to accurately predict shear resistance and slip behavior, underscoring that connection design cannot rely on empirical rules derived from a single material [27]. Meanwhile, long-term durability studies of adhesive-bonded joints by Giv, et al. [28] showed that wet-cast joints and ductile adhesives (e.g., PUR) generally outperform dry-cast joints and brittle epoxies under outdoor and combined environmental-load conditions. The results also indicate that interface properties may evolve significantly over time, suggesting that long-term environmental effects must be incorporated into design and maintenance strategies for engineering applications [28].

At the component and system levels, Pan, et al. [29] proposed and numerically validated a hybrid high-rise system that integrates lightweight timber modules with a reinforced-concrete core wall. In this system, every three stories are partially replaced by timber modules. Nonlinear time-history analyses revealed that reduced structural mass results in lower seismic demand, reflected in reduced base shear and interstory drifts [29]. These findings demonstrate that the proposed hybrid system not only complies with current regulatory requirements but also delivers seismic performance and carbon reduction benefits for high-rise buildings. In addition, stability studies on slab-type composite elements have provided new insights. Research on the axial-compression buckling behavior of NLT (nail-laminated timber) – concrete composite slabs by Gan, et al. [30] showed that in-plane axial compression induced by lateral actions can trigger plate-strip buckling due to low through-thickness stiffness. Experimental results and refined finite-element models incorporating initial buckling modes consistently revealed a characteristic two-span buckling pattern and associated failure mechanisms [30]. The study also provided ultimate axial capacities per unit width and displacement as well as moment–slip curves, offering direct experimental references for the buckling design of slab-type composite elements.

Current research on wood-concrete composite components has established three key consensus points. Firstly, moderate material blending and lightweight design can reduce seismic requirements and enhance ductility without compromising safety. Secondly, the type of interface connection and construction method directly determine both short-term mechanical performance and long-term durability, necessitating parameter calibration based on experimental data. Thirdly, integrating high-quality experimental data with calibrated numerical models is essential for engineering implementation and standardized design. Future work should emphasize multi-field coupled durability tests, standardization of

connections, and life-cycle performance and carbon footprint assessments at larger structural scales, thereby promoting the industrialization and codification of wood–concrete hybrid structures.

Results and discussion. A holistic analysis of the literature shows substantive advances in enhancing engineered wood materials. However, several common principles and critical issues merit further investigation:

1. Micromechanical constraints on macroscopic performance remain prominent. Timber behavior during hydrothermal softening, densification, and bending is governed by cell-wall composition, moisture content, lignin softening, and cell-wall slippage. Existing studies clarify some micromechanisms, but a unified theoretical framework across species and processes is missing. This gap limits the predictive power of models and constrains performance-controlled design.

2. The glued interface is often the weak link in component reliability. The performance of glued timber under bending, compression, and fire conditions strongly depends on adhesive quality and interface stability. Studies indicate that adhesive layers tend to deteriorate preferentially at elevated temperatures, and char-layer shedding can further alter heat-transfer paths and stress distributions. Systematic data on interface aging and coupled environmental effects remain scarce, posing a challenge for the long-term reliability assessment of compressed and compressed–bendable components.

3. A gap exists between laboratory forming techniques and industrial implementation. Hydrothermal softening, localized densification, and various modification techniques have substantially improved the formability of bendable components, but most work remains at the laboratory scale. The forming stability, dimensional consistency, and process continuity for large-scale components have not been fully validated. Moreover, there is currently no unified assessment framework or systematic methodology to evaluate the cost-effectiveness and industrial viability of different softening technologies.

4. Interface behavior in composite systems remains highly complex. Wood–concrete composite structures show excellent load-bearing, slip, and energy-dissipation characteristics. But connection performance is highly sensitive to humidity, freeze–thaw cycles, fatigue, and long-term loading. Most existing models rely on short-term tests, which cannot accurately predict interface degradation or structural performance over a full service life.

5. Sustainability assessments require further systematization and regionalization. Environmental impact assessment studies, such as life cycle assessment research, have been conducted for glued and compressed wood products. However, differences in regional forestry resources, processing energy mixes, and climate conditions make it hard to apply current LCA data to different geographic contexts. Incomplete recycling pathways also prevent a full life-cycle closure of environmental impact assessments.

In summary, engineered wood materials are shifting from experience-driven practice to mechanism-driven, multiscale design and multi-material integration. This marks a major direction in structural engineering materials research.

Conclusion. Bendable wood structures, compressed–bendable elements, and wood–concrete composite structures constitute the core of contemporary engineered wood materials. They demonstrate broad application potential in terms of mechanical properties, formability, fire resistance, and sustainability. Analysis of existing literature indicates that techniques such as densification, laminate optimisation, hydrothermal softening, and localised reinforcement can significantly enhance wood's strength, plasticity, and durability. Adhesive systems and interface design play a critical role in structural reliability, and wood–concrete composite systems offer clear advantages for seismic resistance and component rehabilitation.

However, major gaps remain in micromechanical understanding, quantifying interfacial behavior, process validation for large-scale components, predicting long-term service performance, and regionally adapting environmental assessment. Future research should prioritize cross-scale testing, multi-material modeling, and full life-cycle analysis to create engineered wood materials that are high-performance, reliable, and sustainable.

Limitations and Future Directions. Although this review attempts to cover multiple research directions, several limitations should be acknowledged. First, heterogeneity among studies in tree species, experimental scale, process parameters, and environmental conditions constrains the direct comparability of results. Second, empirical data are insufficient for some critical mechanisms – such as adhesive aging, high-temperature interface behavior, and performance

degradation under coupled hydrothermal conditions – limiting the precision of integrated conclusions. Third, the literature is dominated by laboratory-scale investigations, and systematic studies of industrial implementation remain scarce. Finally, the lack of standardized protocols for environmental impact assessment introduces uncertainty into sustainability evaluations of timber systems.

Future engineered wood research will explore multiscale mechanisms, interface-dominated performance, intelligent manufacturing, system-level integration, and sustainability. Advances in high-resolution imaging, digital modeling, intelligent manufacturing, and material modification will help timber systems move from single-property optimization to multifunctional, high-performance, whole-life design. This transition can make them a key enabler for green buildings and low-carbon infrastructure.

REFERENCES

1. Yao, L., Xu, M., Sun, D., & Wang, Z. (2024). Research on Teak Furniture Design and Node Optimization Based on Solid Wood Bending Technology. *Furniture & Interior Design*, 31(08), 78–85. (In Chinese).
2. Kubojima, Y., Okano, T., & Ohta, M. (2000). Bending strength and toughness of heat-treated wood. *Journal of Wood Science*, 46(1), 8–15. DOI: 10.1007/BF00779547.
3. Li, R. (2025). Comparative study on overall, surface and centre compressed solid wood. *Scientific Reports*, 15(1). DOI: 10.1038/s41598-025-05827-y.
4. Bal, B.C. (2021). Effect of span length on the impact bending strength of poplar and pine woods. *BioResources*, 16(2), 4021–4026. DOI: 10.15376/biores.16.2.4021-4026.
5. Ribeiro, A.B. (2024). *Moment Resistant Joints for Timber Frames (PHD)*. Coimbra: University of Coimbra.
6. Liu, W., & Yang, H. (2008). Experimental study on flexural behavior of engineered wood beams. *Journal of Building Structures*, 29(1), 90–95. (In Chinese).
7. Rao, Z., Wang, J., & Ning, F. (2020). Experimental study of negative bending performance of glulam T beam. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 40(8), 155–163. (In Chinese).
8. Yao, T., Wang, J., Ning, F., & Rao, Z. (2019). Experimental research on flexural bearing capacity of larch glulam T-beam. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 39(5), 124–131. (In Chinese).
9. Shang, P., Sun, Y.-F., Zhou, D., Qin, K.-R., & Yang, X. (2018). Experimental Study of The Bending Performance of Hollow Glulam Beams. *Wood and Fiber Science*, 50(1), 3–19. DOI: 10.22382/wfs-2018-002.
10. Kytka, T., Gašparík, M., Sahula, L., Novák, D., Karami, E., Das, S., & Sviták, M. (2024). Predicted and Experimental Bending Behaviour of Glulam Bonded by RPF Adhesive. *Materials*, 17(2). DOI: 10.3390/ma17020514.
11. He, M., Wang, Y., Li, Z., Zhou, L., Tong, Y., & Sun, X. (2022). An Experimental and Analytical Study on the Bending Performance of CFRP-Reinforced Glulam Beams. *Frontiers in Materials*, 8. DOI: 10.3389/fmats.2021.802249.
12. Korolchenko, D.A., & Portnov, F.A. (2024). Study on Structural Fire Protection and Fire Resistance of Glued Laminated Timber Columns. *Buildings*, 14(12). DOI: 10.3390/buildings14124049.
13. Cao, H. (2010). Study on Wood Properties of Citrus Japonica. *Journal of Huangshan University*, 12(5), 95–97. DOI: 10.3969/j.issn.1672-447X.2010.05.030. (In Chinese).
14. Zhang, Y., Song, K., & Tong, D. (2012). Mechanism of wood grain compression ratio and PDR influence. *Forestry machinery and woodworking equipment*, 40(11), 35–37.
15. Li, X., & Zhao, Y. (2024). Bending Performance of Water Saturated White Birch and Ash Wood at 20–100 °C. *Forests*, 15(7). DOI: 10.3390/f15071077.
16. Wu, Y., Zhu, J., Qi, Q., & Cui, L. (2022). Research progress of solid wood bending softening technology. Review. *Wood Research*, 67(6), 1056–1073. DOI: 10.37763/wr.1336-4561/67.6.10561073.

17. Barnes, H.M., Sanders, M.G., & Lindsey, G.B. (2014). Compression and bending strength of steamed, treated hardwoods. *BioResources*, 9(1), 537–544.
18. Lee, I.-H., & Kim, K.-H. (2021). Influence of adhesive and layer composition on compressive strength of mixed cross-laminated timber. *BioResources*, 16(4), 7461–7473.
19. Qian, C. (2023). Study on Manufacturing Technology of Structural Glulam. *Value Engineering*, 145–148. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4311.2023.21.044. (In Chinese).
20. Yang, H., Wei, S., Shi, M., & Gao, B. (2023). Fire resistance test of glued wood floor in wooden structure building. *Building Structure*, 53(22), 134–139. DOI: 10.19701/j.jzjg.20210159. (In Chinese).
21. Hu, X., Chen, L., Xu, Q., Han, C., & Leng, Y. (2020). Experimental study of the mechanical behavior of glulam beams exposed to three-side fire. *Building Structure*, 50(16), 87–93. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.16.015. (In Chinese).
22. Zhang, J., Sun, Y., Wang, Y., Lu, C., Wang, W., & Wu, L. (2022). Experimental study on fire performance of cross laminated. *Journal of Building Structures*, 43(9), 115–127. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0603. (In Chinese).
23. Van Hai, L., Pham, D. H., & Kim, J. (2022). Effect of Bleaching and Hot-Pressing Conditions on Mechanical Properties of Compressed Wood. *Polymers*, 14(14). DOI: 10.3390/polym14142901.
24. Wei X., & Guo W. (2023). Study on the bending behavior of steel splice joint between laminated wood elements. *Architecture Technology*, 54(20), 2505–2508. (In Chinese).
25. Yao, L., Song, F., Wei, M., Wang, A., Xu, X., Chen, Z., ... Jiang, P. (2025). Flame-Retardant Wood Scrimber/Plywood Composites: Preparation, Characterization, and Enhanced Structural Performance. *Polymers*, 17(18). DOI: 10.3390/polym17182556.
26. Dominguez-Santos, D., Mora-Melia, D., Pincheira-Orellana, G., Ballesteros-Pérez, P., & Retamal-Bravo, C. (2019). Mechanical Properties and Seismic Performance of Wood-Concrete Composite Blocks for Building Construction. *Materials*, 12(9). DOI: 10.3390/ma12091500.
27. Wang, Z., Wei, Y., Jiang, J., Zhao, K., & Zheng, K. (2020). Comparative Study on Mechanical Behavior of Bamboo-Concrete Connections and Wood-Concrete Connections. *Frontiers in Materials*, 7. DOI: 10.3389/fmats.2020.587580.
28. Giv, A.N., Asante, B., Yan, L., & Kasal, B. (2024). Shear performance and durability of adhesively bonded spruce wood-concrete composite joints: Effects of indoor and outdoor environmental conditions, mechanical load, and their coupled effect. *Construction and building materials*, 436. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136905.
29. Pan, Y., Tannert, T., Kaushik, K., Xiong, H., & Ventura, C.E. (2021). Seismic performance of a proposed wood-concrete hybrid system for high-rise buildings. *Engineering Structures*, 238. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112194.
30. Gan, Z., He, M., Li, Z., & Sun, Y. (2025). Buckling performance of a two-span nail-laminated timber-concrete composite floor under axial load. *China Civil Engineering Journal*, 58(9), 55–63. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.24010068. (In Chinese).

Поступила 19.01.2026

ДРЕВЕСИНА КАК КОНСТРУКЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

ЛИЮНЬ ЦЗЭН¹⁾, А.И. ГИЛЬ²⁾, ЮФЭН ЛИ³⁾

(^{1,3)} Университет Паньчжихуа, Китай,

²⁾ Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье представлен систематический обзор последних разработок в области изгибаемых и внецентренно сжатых элементов, композитных элементов из дерева и бетона, с акцентом на актуальное состояние вопроса, включая механические характеристики древесины, процессы изготовления, огнестойкость, механизмы

сопряжения и оценку долговечности. В результате анализа было установлено, что клееная древесина, благодаря своей многослойной структуре, высокой прочности при изгибе и контролируемой работе под нагрузкой, имеет явные преимущества по огнестойкости, изгибу и применению в композитных системах, хотя работа конструкции при высоких температурах и длительном воздействии нагрузки требует дополнительных исследований. Несмотря на прогресс в изучении изгибаемых деревянных конструкций, обусловленный достижениями в области гидротермального размягчения, локального уплотнения, модификации материалов и инноваций в области формирования поперечного сечения, остаются проблемы, связанные со стабильностью изготовления и непрерывностью производственного процесса для крупногабаритных конструкций. Конструкции из древесно-бетонных композитных материалов обладают высокой пластичностью, рассеиванием энергии и сейсмическими характеристиками, но остается неопределенность в отношении долгосрочной прочности соединений и работы в условиях неблагоприятной окружающей среды. В целом древесина как конструкционный материал развивается от изучения отдельных его свойств к разработке многомасштабной парадигмы «материал-поверхность-структура-окружающая среда». Дальнейшая работа в данной области должна углубить понимание механики, многомасштабного моделирования, индустриализации процессов и исследований в области устойчивого применения данных конструкций для создания высокопроизводительных деревянных конструктивных систем.

Ключевые слова: строительство из древесины, композитные конструкции из дерева и бетона, устойчивость, сжатие, изгиб.

УДК 624.012.45

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-11-24

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАГРУЗКИ И ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

*д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ¹⁾, канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ²⁾,
канд. техн. наук, доц. А.М. ХАТКЕВИЧ³⁾, канд. техн. наук, доц. А.И. ГИЛЬ⁴⁾,
канд. техн. наук, доц. А.И. КОЛТУНОВ⁵⁾, канд. техн. наук Э. ЧАПАРАНГАНДА⁶⁾*
(^{1), 3)-⁵⁾ Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,}

²⁾ ООО «СофтКлуб», Минск, ⁶⁾ Ботсванский международный университет науки и технологий

¹⁾d.lazovskii@psu.by, ²⁾d.gluhov@psu.by, ³⁾a.khatkevich@psu.by, ⁴⁾a.hil@psu.by, ⁵⁾a.koltunov@psu.by, ⁶⁾katsvikisire@gmail.com

Методы расчета параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при воздействии нагрузки и высокой температуры постоянно совершенствуются. Нелинейная деформационная модель расчета для строительных конструкций (железобетонных, сталежелезобетонных, каменных и армокаменных, деревянных) при силовых, температурно-влажностных и длительных воздействиях позволяет получать параметры их напряженно-деформированного состояния на любой стадии деформирования, учитывать физическую нелинейность работы материалов, стадийность воздействий.

Выполнен анализ исследований влияния повышенных (от 50 °С до 200 °С включительно) и высоких (свыше 200 °С до 1400 °С) температур на параметры базовых точек диаграмм деформирования бетона и арматуры железобетонных элементов. Моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонного элемента выполнялось с учетом вынужденных температурно-влажностных деформаций материалов. Проведена верификация предложенной методики для расчета параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при воздействии нагрузки и высокой температуры, а также их огнестойкости.

Ключевые слова: *нелинейная деформационная расчетная модель, напряженно-деформированное состояние, параметры базовых точек диаграмм деформирования бетона и арматуры при действии высоких температур, вынужденные температурные деформации, расчет огнестойкости железобетонных конструкций.*

Введение. При температурных воздействиях выше 100 °С на железобетонные конструкции под нагрузкой изменяются их параметры напряженно-деформированного состояния вследствие вынужденных температурных деформаций в сочетании с температурной усадкой бетона, нарушения сцепления арматуры с бетоном при разности их коэффициентов температурного расширения, изменения прочностных и деформационных характеристик материалов, что отражается на их сопротивлении силовым воздействиям.

Согласно исследованиям [1–6] первоначальная прочность бетона при сжатии сохраняется до температуры в 200–300 °С. При увеличении температуры нагрева из-за разложения гидратов цементного камня и потери минералами химически связанной воды его прочность снижается. Разрушение структуры бетона происходит не только в цементном камне, но и по контакту с заполнителем из-за разницы их температурных деформаций (наибольшими температурными деформациями обладает гранитный щебень при температуре выше 600 °С [4; 5]). При этом из-за образования микротрещин при остывании нагретого бетона продолжается его прочности [4–7]. Модуль упругости, прочность при растяжении и при растяжении с изгибом начинает уменьшаться уже при 150–200 °С [4; 5; 8]. Основное снижение физико-механических характеристик бетона происходит в период времени нагрева [5; 6; 9]. При длительном воздействии высокой температуры физико-механические характеристики бетона продолжают снижаться.

Исследования о влиянии высокотемпературного воздействия на прочность бетона при растяжении до настоящего времени весьма ограничены из-за меньшего влияния на прочность железобетонных элементов [10].

Действующие в настоящее время нормативные документы в области расчета и конструирования железобетонных конструкций при действии повышенных (от 50 °С до 200 °С включительно) и высоких (свыше 200 °С до 1400 °С) температур влияние температуры на прочностные и деформационные характеристики свойств бетона и арматуры учитывается с помощью системы корректирующих коэффициентов к их основным (базовым) характеристикам свойств при $\theta_0 = 20$ °С^{1,2,3,4}.

¹ СП 27.13330.2017. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур: утв. и введ. в действие приказом М-ва стр-ва и жилищ.-коммунал. хоз-ва Рос. Федерации от 15 мая 2017 г. N 786/пр. – М.: Стандартинформ, 2017. – 106 с.

СП 21-00-00. Огнестойкость и огнесохранность железобетонных конструкций: утв. приказом М-ва стр-ва и жилищ.-коммунал. хоз-ва Рос. Федерации от 10 декабря 2019 № 790/пр. – М.: Стандартинформ, 2020. – 86 с.

СТО 36554501-006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций из тяжелого бетона: утв. приказом и. о. ген. директора ФГУП «НИЦ Строительство» от 20 октября 2006 г. № 156. – М.: ФГУП НИЦ «Строительство», 2006. – 83 с.

Пособие по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций из тяжелого бетона (к СТО 36554501-006-2006): утв. НИИЖБ им. А.А. Гвоздева: введ. впервые: дата введения 2008.01.01 / разработано А.Ф. Миловановым, В.В. Соломоновым, И.С. Кузнецовой [и др.]. – М.: НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, 2008. – 213 с.

КМК 2.03.04-98. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. – Ташкент, 1998. – 115 с.

² EN 1992-1-2:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules Structural fire design. – Supersedes ENV 1992-1-2:1995; This European Standard was approved by CEN on December 2004. – Brussels: CEN, 2004. – 99 p.

³ ДСТУН Б EN 1992-1-2:2012. Еврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1.2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992.1.2:2004, IDT): затв. наказом Державного наук.-дослід. ін-ту будівельних конструкцій від 21 грудня 2012 р. № 652: введ. вперше: надано чинності 2013.07.01 / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». – Київ: Мінрегіон України, 2013. – 135 с.

⁴ ТКП EN 1992-1-2:2009 (02250). Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости // РУП «Стройтехнорм» М-ва архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2022. – 76 с.

Температурные деформации в сочетании с деформациями температурной усадки, а также температурные усилия в статически неопределимых элементах в общем случае определяют через кривизну приведенного поперечного сечения элемента, с предварительной разбивкой на части с различной температурой нагрева [9].

В нормативных документах⁵, принятых на основе⁶, а также в исследованиях⁷ [4; 6; 7; 11–14] наряду с упрощенными методами оценки прочности железобетонных элементов при высоких температурах приводятся данные для возможности применения нелинейной деформационной модели на основе диаграмм деформирования бетона и арматуры при сжатии-растяжении. В нормативных документах⁸ аппроксимации диаграмм деформирования учитывают специфику работы под нагрузкой в сочетании с температурными воздействиями.

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при воздействии нагрузки и температуры на основе нелинейной деформационной модели поперечных сечений позволяет получать результаты, отражающие их реальную работу с высокой степенью точности. Это достигается применением в расчете аппроксимаций диаграмм деформирования бетона и арматуры, близким к реальным [6; 7; 13–16].

Цель настоящего исследования – практическая реализация нелинейной деформационной модели к расчету параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при воздействии нагрузки и высокой температуры, а также их огнестойкости; верификация теоретических результатов.

Диаграммы деформирования бетона и арматуры при действии высокой температуры. Диаграммы деформирования бетона при кратковременном сжатии и воздействии температуры θ для нелинейной деформационной модели принимаем в соответствии с документами⁹ (рисунок 1, а) с базовыми точками: сопротивление сжатию $f_{c,\theta}$, относительная деформация, соответствующая $f_{c,\theta}$, а также предельные деформации при сжатии $\varepsilon_{c1,\theta}$. Параметры базовых точек диаграммы деформирования зависят от температуры в интервале (20; 1200) °С, вида заполнителя: карбонатный или силикатный. Ниспадающую ветвь диаграммы деформирования бетона при сжатии согласно нормативному документу¹⁰ рекомендуется принимать линейной или иной аппроксимации (при наличии экспериментальных данных для конкретного режима нагрева). В настоящем исследовании принята линейная аппроксимация ниспадающей ветви.

Аппроксимация диаграммы бетона при растяжении принята нелинейной с ниспадающей ветвью и двумя базовыми точками (в вершине диаграммы, параметры которой зависят от температуры нагрева в интервале (20; 600) °С; предельные относительные деформации растяжения ε_{cti} принимаются для нормальных температурно-влажностных условий из-за отсутствия экспериментальных данных влияния температуры) (см. рисунок 1, а).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{c,\theta} = \frac{3\varepsilon_{c,\theta} f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}; \quad 0 \leq \varepsilon_{c,\theta} \leq |\varepsilon_{c1,\theta}|; \\ \sigma_{c,\theta} = \frac{f_{c,\theta} (\varepsilon_{c,\theta} - \varepsilon_{c1,\theta})}{\varepsilon_{ct1,\theta} - \varepsilon_{c1,\theta}}; \quad |\varepsilon_{c1,\theta}| < \varepsilon_{c,\theta} \leq |\varepsilon_{ct1,\theta}|; \\ \sigma_{ct,\theta} = f_{ct,\theta} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_{ct,\theta}}{\varepsilon_{ct1,\theta}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_{ct,\theta}}{\varepsilon_{ct1,\theta}} \right)^2 \right]; \quad 0 < \varepsilon_{ct,\theta} \leq \varepsilon_{ct1,\theta}; \\ \sigma_{ct} = \frac{f_{ct,\theta} \varepsilon_{ct1,\theta}}{\varepsilon_{ct,\theta}} = \frac{2f_{ct,\theta} \varepsilon_{cti}}{K \varepsilon_{ct,\theta}}; \quad \varepsilon_{ct1,\theta} \leq \varepsilon_{ct,\theta} \leq \varepsilon_{cti}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\sigma_{c,\theta}$ ($\sigma_{ct,\theta}$) – напряжения при сжатии (растяжении) при температуре θ ;
 $\varepsilon_{c,\theta}$ ($\varepsilon_{ct,\theta}$) – относительные деформации при сжатии (растяжении) при температуре θ ;
 $\varepsilon_{c1,\theta}$ – относительные деформации бетона в вершине диаграммы деформирования при температуре θ ;
 $f_{ct,\theta} = k_{ct}(\theta) \cdot f_{ct}$ – прочность бетона при растяжении при температуре θ ;
 $f_{c,\theta}$ – призмная прочность при сжатии при температуре θ ;
 ε_{ct1} – относительные деформации в вершине диаграммы деформирования;
 ε_{cti} – предельное значение относительных деформаций бетона при растяжении.

В формуле (1) значения относительных деформаций бетона при растяжении ε_{ct1} и ε_{cti} при температуре 20 °С определяются по формулам:

$$\varepsilon_{cti} = \frac{K \cdot \varepsilon_{ct1}}{2}; \quad K = 6,4 + 0,1223 f_c. \quad (2)$$

⁵ См. сноски 3 и 4.

⁶ См. сноску 2.

⁷ Левитский Е.В. Диаграммный метод решения статической задачи расчета огнестойкости железобетонных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Левитский Валерий Евгеньевич. – М.: МИИТ, 2006. – 23 с.

⁸ См. сноски 2, 3 и 4.

⁹ См. сноски 2, 3 и 4.

¹⁰ См. сноску 4.

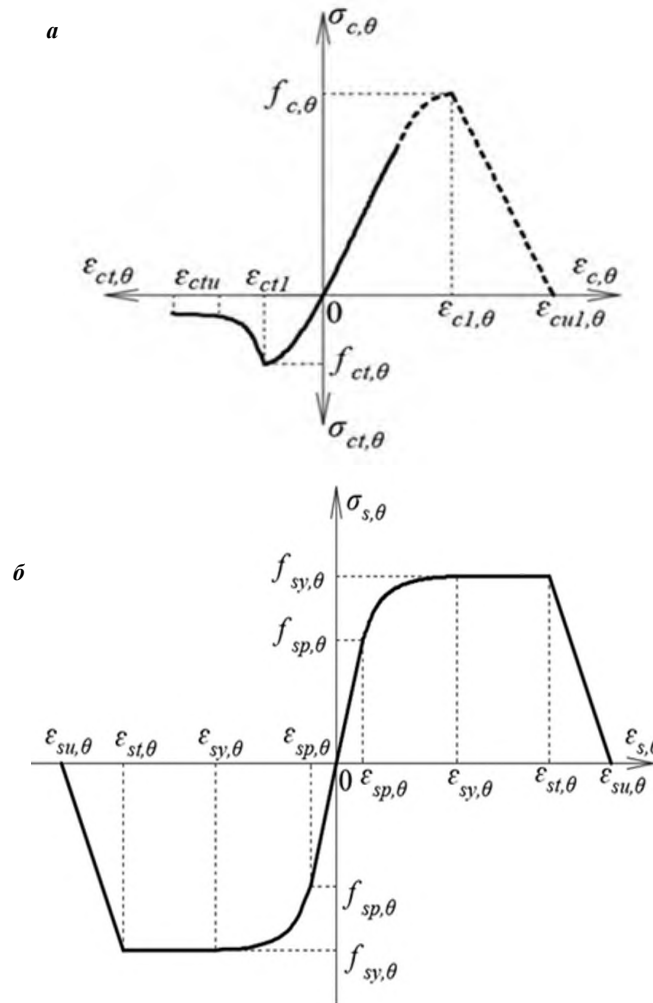


Рисунок 1. – Диаграммы деформирования при кратковременном нагружении и воздействии высоких температур бетона (а) и арматуры (б)

Диаграмма деформирования ненапрягаемой арматуры при растяжении (сжатии) железобетонных элементов под нагрузкой и температурном воздействии согласно¹¹ принимается нелинейной для восходящей ветви с горизонтальным участком и наклонной линейной нисходящей ветвью (рисунок 1, б). Диаграмма деформирования арматуры определяется тремя параметрами, зависящими от температуры θ : модулем упругости $E_{s,\theta}$; пределом пропорциональности $f_{sp,\theta}$; максимальным уровнем напряжений $f_{sy,\theta}$.

$$\begin{cases} \sigma_{s,\theta} = \varepsilon_{s,\theta} E_{s,\theta}; & 0 \leq \varepsilon_{s,\theta} \leq \varepsilon_{sp,\theta} \\ \sigma_{s,\theta} = f_{sp} - c + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{s,\theta})^2}; & \varepsilon_{sp,\theta} < \varepsilon_{s,\theta} \leq \varepsilon_{sy,\theta}; \\ \sigma_{s,\theta} = f_{sy,\theta}; & \varepsilon_{sy,\theta} < \varepsilon_{s,\theta} \leq \varepsilon_{st,\theta}; \\ \sigma_{s,\theta} = f_{sy} \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{s,\theta} - \varepsilon_{st,\theta}}{\varepsilon_{su,\theta} - \varepsilon_{st,\theta}} \right); & \varepsilon_{st,\theta} < \varepsilon_{s,\theta} \leq \varepsilon_{su,\theta}; \\ \sigma_{s,\theta} = 0; & \varepsilon_{s,\theta} = \varepsilon_{su,\theta}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\sigma_{s,\theta}$ – напряжения при сжатии (растяжении) при температуре θ ;
 $\varepsilon_{s,\theta}$ – относительные деформации при сжатии (растяжении) при температуре θ ;
 $\varepsilon_{sp,\theta}$ – относительные деформации, соответствующие пределу пропорциональности $f_{sp,\theta}$ при температуре θ ;
 $\varepsilon_{sy,\theta}$ – относительные деформации, соответствующие началу площадки текучести при напряжении предела текучести $f_{sy,\theta}$ при температуре θ ;
 $\varepsilon_{st,\theta}$ – относительные деформации, соответствующие концу площадки текучести при напряжении предела текучести $f_{sy,\theta}$ при температуре θ ;

¹¹ См. сноску 2.

$\varepsilon_{su,\theta}$ – предельные относительные деформации арматуры при растяжении при температуре θ ;
 f_{sp} и f_{sy} – предел пропорциональности и предел текучести арматуры при нормальной (около 20 °С) температуре.

В формуле (3) вспомогательные переменные a , b , c определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} a^2 &= \varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} \left(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + \frac{c}{E_{s,\theta}} \right); \\ b^2 &= c \cdot (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) \cdot E_{s,\theta} + c^2; \\ c &= \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}. \end{aligned} \quad (4)$$

Температурные деформации бетона и арматуры. Нелинейная деформационная расчетная модель железобетонных элементов при совместном силовом и высокотемпературном воздействиях позволяет учесть дополнительные вынужденные температурные деформации из-за разности коэффициентов температурного расширения бетона и арматуры, которые не проявляются в работе железобетона в обычных условиях. При этом принимаем условие совместности деформаций арматуры и бетона (справедлива гипотеза плоских сечений для распределения средних относительных деформаций по поперечному сечению железобетонного элемента) [16–17].

Аналогично [3; 7; 15–17] суммарные температурные деформации вычисляются как сумма составляющих для бетона и арматуры (для бетона и арматуры обратимые деформации температурного расширения $\varepsilon_c(\theta)$ и $\varepsilon_s(\theta)$; для бетона также необратимые деформации температурной усадки $\varepsilon_{cs}(\theta)$ с коэффициентом температурной усадки $\alpha_{cs}(\theta)$ [13]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cs}(\theta) &= (\varepsilon_c(\theta) - \varepsilon_{cs}(\theta)) + \varepsilon_s(\theta); \\ \varepsilon_{cs}(\theta) &= \alpha_{cs}(\theta) \cdot \Delta T. \end{aligned} \quad (5)$$

Температурная деформация бетона при температуре θ °С, отсчитываемой от температуры 20 °С, вычисляется по следующим выражениям¹²:

– для силикатных заполнителей

$$\begin{aligned} \varepsilon_c(\theta) &= -1,8 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-6} \cdot \theta + 2,3 \cdot 10^{-11} \cdot \theta^3 \quad \text{при } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700^\circ\text{C}; \\ \varepsilon_c(\theta) &= 14 \cdot 10^{-3} \quad \text{при } 700^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}; \end{aligned} \quad (6)$$

– для карбонатных заполнителей

$$\begin{aligned} \varepsilon_c(\theta) &= -1,2 \cdot 10^{-4} + 6 \cdot 10^{-6} \cdot \theta + 1,4 \cdot 10^{-11} \cdot \theta^3 \quad \text{при } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 805^\circ\text{C}; \\ \varepsilon_c(\theta) &= 12 \cdot 10^{-3} \quad \text{при } 805^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (7)$$

Температурная деформация ненапрягаемой арматуры при температуре θ °С, отсчитываемой от температуры 20 °С, согласно [17] вычисляется по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} \varepsilon_s(\theta) &= -2,416 \cdot 10^{-4} + 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta + 0,4 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^2 \quad \text{при } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 750^\circ\text{C}; \\ \varepsilon_s(\theta) &= 11 \cdot 10^{-3} \quad \text{при } 750^\circ\text{C} < \theta \leq 860^\circ\text{C}; \\ \varepsilon_s(\theta) &= -6,2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta \quad \text{при } 860^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (8)$$

Следует отметить, что дополнительная температурная усадка бетона при повышенных температурах развивается при постепенном высыхании бетонных конструкций от начальной влажности до равновесной с окружающей средой при повышенных температурах. В нормативных документах¹³ для расчета огнестойкости железобетонных конструкций эта составляющая не учитывается.

Учитывая, что значения температурных деформаций зависят от температуры, которая распределяется по поперечному сечению железобетонного элемента неравномерно, и отсутствия нарушения сплошности бетона, в предположении применимости гипотезы плоских сечений вынужденные температурные деформации $\varepsilon_c(\theta)$ усредняются: для температурного воздействия θ °С со всех наружных граней элемента – в виде прямоугольной эпюры; для неравномерного по поверхности температурного воздействия – с градиентом относительных деформаций в виде трапецевидной эпюры. Температурно-влажностные воздействия в виде вынужденных усредненных деформаций от температурной усадки и температурного расширения бетона (как разность с температурным

¹² См. сноску 4.

¹³ См. сноски 2 и 4.

расширением арматуры) учитываются в нелинейной деформационной расчетной модели наложением на бетон расчетного поперечного сечения железобетонного элемента вынужденных дополнительных относительных деформаций усадки бетона $\varepsilon_{cs}(\theta)$ [16–17].

Расчет напряженно-деформированного состояния при совместном силовом и температурно-влажностном воздействии. Определение параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при действии нагрузки и температуры в общем случае с момента времени его изготовления предполагает, кроме силового воздействия, учет вынужденных необратимых деформаций усадки бетона при его твердении $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$, имеющего возраст t_s к началу воздушно-сухого хранения, к моменту времени высокотемпературного воздействия t , а также суммарные деформации $\varepsilon_{cs}(\theta)$ температурной усадки и температурного расширения бетона и арматуры при температуре θ °С (выражение (5)).

Для реализации нелинейной расчетной деформационной модели при воздействии силовых факторов (в общем случае: M_x, M_y, N) и высокой температуры θ °С поперечное сечение железобетонного элемента разбивается на элементарные площадки бетона и арматуры. Для каждой элементарной площадки в зависимости от распределения температуры θ °С по поперечному сечению (определяется теплотехническим расчетом) устанавливаются параметры базовых точек диаграмм деформирования бетона и арматуры.

Расчет напряженно-деформированного состояния на основе нелинейной деформационной модели производится в два этапа. На первом этапе рассматривается незагруженный внешней нагрузкой железобетонный элемент. При действии усадочных деформаций $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ и деформаций температурной усадки $\varepsilon_{cs}(\theta)$ в арматуре возникают деформации сжатия, а в бетоне – деформации растяжения. Наложение деформаций температурного расширения из-за превышения значения коэффициента температурного расширения арматуры $\alpha_s(\theta)$ над аналогичным коэффициентом для бетона $\alpha_c(\theta)$ при температуре θ °С [15] приводит к увеличению значений относительных деформаций сжатия в арматуре $\varepsilon_s(\theta)$ и относительных деформаций растяжения в бетоне $\varepsilon_c(\theta)$. С позиций нелинейной деформационной модели на первом этапе рассматривается поперечное сечение железобетонного элемента, состоящее только из арматурных стержней, для которого справедлива гипотеза плоских сечений, и на который действует, в общем случае, внецентренно приложенное сжимающее усилие от суммарного температурно-влажностного воздействия бетона. В результате расчета определяются относительные деформации в стержнях арматуры, а также дополнительные относительные деформации элементарных площадок бетона. Полученные на первом этапе расчета относительные деформации железобетонного элемента будут являться исходными на последующих стадиях его работы.

В общем случае расчета параметров напряженно-деформированного состояния железобетонного элемента в момент времени t при высокотемпературном воздействии $\theta(x, y)$ °С в двух плоскостях силового воздействия система уравнений, состоящая из уравнений равновесия и гипотезы плоских сечений, описывающей положение плоскости распределения относительных деформаций по его поперечному сечению, на первой стадии расчета имеет вид:

$$\begin{cases} \iint \sigma(\varepsilon(x, y, \theta)_I)(x - x_0) dx dy = 0; \\ \iint \sigma(\varepsilon(x, y, \theta)_I)(y - y_0) dx dy = 0; \\ \iint \sigma(\varepsilon(x, y, \theta)_I) dx dy = 0; \\ \varepsilon(x, y, \theta)_I = \varepsilon_z + 1/r_x(x - x_0) + 1/r_y(y - y_0) + \varepsilon_{cs}(t, t_s) + \varepsilon_{cs}(\theta(x, y)), \end{cases} \quad (9)$$

где $\sigma(x, y, \theta)$, $\varepsilon(x, y, \theta)_I$ – нормальные напряжения, относительные деформации на первой стадии расчета в элементарной площадке бетона, арматуры с координатами (x, y) при температуре $\theta(x, y)$;

x_0 и y_0 – координаты центра тяжести поперечного сечения железобетонного элемента;

$1/r_x$ и $1/r_y$ – кривизна продольной оси железобетонного элемента относительно соответственно оси x и y ;

ε_z – относительная деформация от действия усилия усадки бетона, соответствующая его центральному приложению;

$\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ – относительные деформации усадки бетона при его твердении;

$\varepsilon_{cs}(\theta(x, y))$ – суммарные относительные деформации температурного расширения и температурной усадки бетона в элементарной площадке с координатами (x, y) .

На втором этапе расчета система уравнений для расчета параметров напряженно-деформированного состояния сжатого железобетонного элемента в двух плоскостях имеет вид:

$$\begin{cases} \iint \sigma(\varepsilon(x, y, \theta)_{II})(x - x_0) dx dy = M_x; \\ \iint \sigma(\varepsilon(x, y, \theta)_{II})(y - y_0) dx dy = M_y; \\ \iint \sigma(\varepsilon(x, y, \theta)_{II}) dx dy = N; \\ \varepsilon(x, y, \theta)_{II} = \varepsilon_{zN} + 1/r_x(x - x_0) + 1/r_y(y - y_0) + \varepsilon(x, y, \theta)_I, \end{cases} \quad (10)$$

где $\sigma(x, y, \theta)_{II}$, $\varepsilon(x, y, \theta)_{II}$ – нормальные напряжения, относительные деформации на второй стадии расчета в элементарной площадке бетона, арматуры с координатами (x, y) и температурой $\theta(x, y)$ °С;

ε_{zN} – относительная деформация в центре тяжести поперечного сечения от действия продольного сжимающего усилия;

$\varepsilon(x, y, \theta)_I$ – относительные деформации в элементарной площадке бетона, арматуры с координатами (x, y) и температурой $\theta(x, y)$ °С, вычисленные на первом этапе расчета.

Потенциал нелинейной деформационной модели в изложенной постановке позволяет для железобетонных элементов при воздействии внешней нагрузки и высокой температуры решать три типа задач:

1) при заданных внешней нагрузке (M_x, M_y, N) и распределении высокой температуры $\theta(x, y)$ °С по поперечному сечению получать картину напряженно-деформированного состояния железобетонного элемента в рассматриваемом поперечном сечении;

2) при заданном распределении высокой температуры $\theta(x, y)$ °С по поперечному сечению получать предельные внутренние усилия (M_{ix}, M_{iy}, N_{ii}), воспринимаемые железобетонным элементом в рассматриваемом поперечном сечении;

3) при заданных внешней нагрузке (M_x, M_y, N) и изменении распределения высокой температуры $\theta(x, y, t)$ °С по поперечному сечению с течением времени t получать предел времени сопротивления t_u железобетонного элемента силовому и температурному воздействию (например, огнестойкость при пожаре).

При решении первого типа задач алгоритм решения системы уравнений (10) предусматривает при заданных усилиях и значениях высокой температуры определение методом последовательных приближений распределения относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению железобетонного элемента с заданной точностью решения уравнений равновесия (внутренний цикл). Решение задач второго и третьего типа выполняется последовательным увеличением: действующих усилий при заданном значении температуры (задача второго типа); времени теплового воздействия (температуры в каждой элементарной площадке (задача третьего типа) с реализацией на каждом этапе расчета внутреннего цикла. Критерием окончания процесса расчета является максимальное значение внутренних усилий (задача второго типа) или времени высокотемпературного воздействия (задача третьего типа), при котором процесс последовательных приближений внутреннего цикла сходится с заданной точностью.

Верификация нелинейной деформационной расчетной модели при действии высоких температур.

Практическое моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонного элемента при действии вынужденных температурных деформаций проведем на примере центрально нагруженной железобетонной колонны круглого поперечного сечения диаметром 300 мм из бетона класса С30/37 ($f_{ck}=30$ МПа; $f_{ctk}=2,9$ МПа; $E_c=33$ ГПа) с силикатным заполнителем и продольной арматурой 8ø16 S500 ($f_{yk}=500$ МПа; $E_s=2 \cdot 10^5$ МПа) класса N с расстоянием от центра тяжести стержня арматуры до наружной поверхности 30 мм. Распределение температуры θ °С по поперечному сечению колонны принимаем в соответствии с нормативным документом¹⁴ при 30-минутном воздействии стандартного пожара (R 30) (рисунок 2).

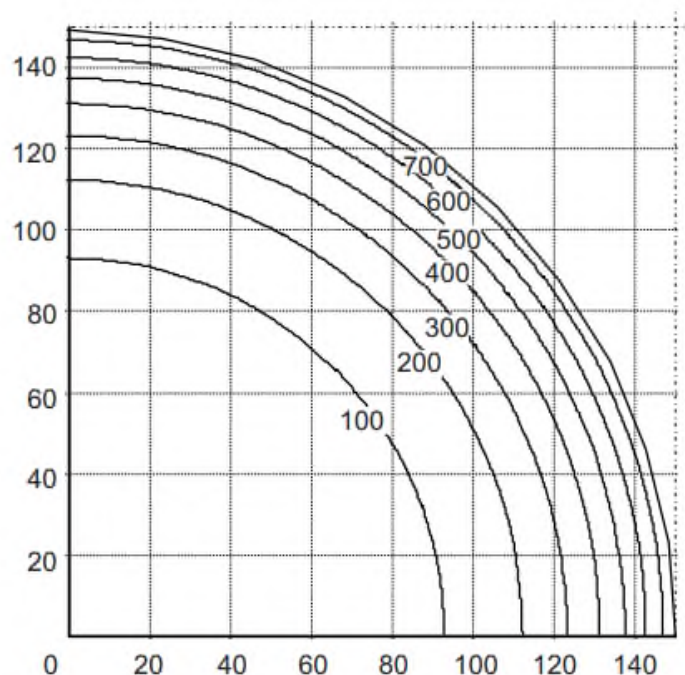


Рисунок 2. – Температурные профили круглой колонны диаметром 300 мм – R 30¹⁵

¹⁴ См. сноску 4.

¹⁵ См. сноску 4.

По таблицам документа¹⁶ определяем параметры базовых точек диаграмм деформирования бетона и арматуры при конкретном значении температуры $\theta(x,y)$ °С на рассматриваемом участке поперечного сечения колонны. По формулам (6) в зависимости от значения температуры вычисляем относительные деформации температурного расширения бетона $\varepsilon_c(\theta)$ для каждого участка. Находим усредненные относительные деформации бетона $\varepsilon_c(\theta)$ в поперечном сечении по формуле:

$$\varepsilon_c(\theta) = \frac{\sum(\varepsilon_{c,i}(\theta) \cdot A_{c,i})}{\sum A_{c,i}}, \tag{11}$$

где $A_{c,i}$ – площадь поперечного сечения i -го участка бетона.

Усредненные по поперечному сечению колонны относительные температурные деформации бетона равны $\varepsilon_c(\theta)=2,71 \cdot 10^{-3}$. Относительные температурные деформации арматуры, находящейся в зоне действия температуры $\theta=300$ °С, вычисляем по формулам (8): $\varepsilon_s(\theta)=3,72 \cdot 10^{-3}$. Тогда суммарные вынужденные относительные деформации для рассматриваемого железобетонного элемента равны:

$$\varepsilon_{\Sigma}(\theta) = \varepsilon_c(\theta) - \varepsilon_s(\theta) = 2,71 \cdot 10^{-3} - 3,72 \cdot 10^{-3} = -1,01 \cdot 10^{-3}.$$

Результаты первой стадии расчета параметров напряженно-деформированного состояния в поперечном сечении круглой колонны и при действии вынужденных температурных деформаций и отсутствии силового воздействия, в их физической интерпретации аналогично документу¹⁷, представлены на рисунке 3. Полученные на первой стадии расчета относительные деформации каждой элементарной площадки бетона и арматуры используются при расчете на второй стадии в системе уравнений (10).

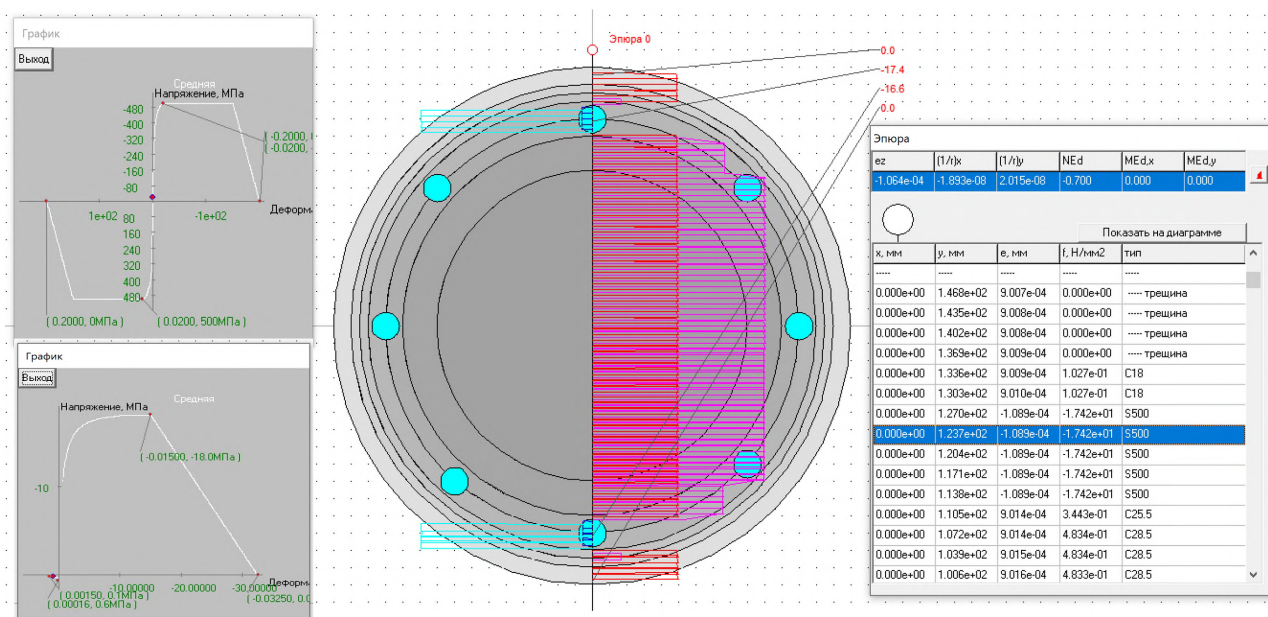


Рисунок 3. – Параметры напряженно-деформированного состояния в поперечном сечении круглой колонны при стандартном воздействии пожара в течение $t=30$ мин без силового воздействия (бетон растянут, в защитном слое бетона ($\theta=700$ °С) образование трещин нормального отрыва; арматура сжата)

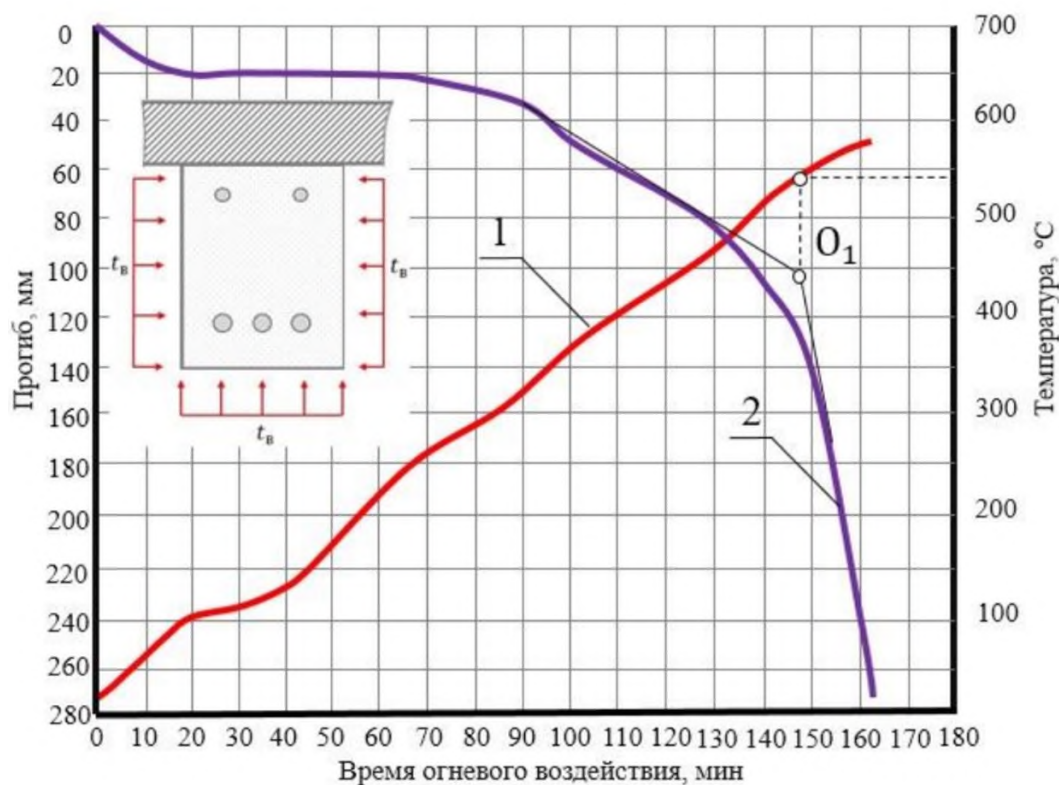
Проверку расчетной несущей способности железобетонных элементов при воздействии высокой температуры пожара (второй тип задач) выполним на примере опытной железобетонной балки, которая во время огневого испытания подвергалась трехстороннему высокотемпературному воздействию стандартного температурного режима пожара. Испытание на огнестойкость проводилось с использованием статически определимой железобетонной балки с размером поперечного сечения 210×410 мм, пролет балки составлял 6,0 м. Балка армирована рабочей арматурой: в растянутой зоне – 3Ø16 класса А-I; в сжатой зоне – 2Ø12 класса А-I. Объемный вес бетона класса В20 составляет 2330 кг/м³, влажность бетона 4%, заполнитель – известняк, защитный слой бетона – 50 мм¹⁸ [17]. Огневое

¹⁶ См. сноску 4.

¹⁷ См. сноску 4.

¹⁸ Яковлев А.И. Основы расчета огнестойкости железобетонных конструкций: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01 / Яковлев Анатолий Иванович; ЦНИИ противопожар. обороны МООН РСФСР. – М., 1966. – 168 л.

испытание проводилось до потери несущей способности. Время до потери несущей способности (предел огнестойкости) балки определялось по кривой прогиба балки путем нахождения точки O_1 – пересечение двух касательных, проведенных к кривой прогиба до начала и в период его резкого увеличения^{19,20}. Разрушение балки происходило плавно из-за текучести арматуры растянутой зоны. Результаты огневого испытания эталонной балки представлены на рисунке 4 в виде усредненной температуры прогрева трех стержней рабочей арматуры балки (кривая 1 на рисунке 4) и кривой развития прогиба балки (кривая 2 на рисунке 4). Значение фактического предела огнестойкости эталонной железобетонной балки по результатам огневого испытания составило R146²¹.



1 – усредненная температура стержней рабочей арматуры; 2 – прогиб балки

Рисунок 4. – Результаты огневого испытания свободно опертой железобетонной балки²²

Вычисляем предельный по прочности изгибающий момент для рассматриваемой балки в ее исходном состоянии при нормальной температуре при $f_{ck}=16$ МПа; $f_{yk}=235$ МПа; $E_c=23 \cdot 10^3$ МПа. В результате расчета: $M_u=46,202$ кНм (рисунок 5). Расчетный (начальный) прогиб балки при характеристических значениях усилий ($\approx 0,7M_u=32,3$ кНм) для равномерно распределенной нагрузки вычисляем исходя из кривизны $1/r=3,302 \cdot 10^{-6}$ мм⁻¹ по формуле:

$$a_{\max,o} = \frac{5}{48}(1/r)l_{eff}^2 = \frac{5}{48}(3,302 \cdot 10^{-6}) \cdot 5800^2 = 11,6 \text{ мм.}$$

Распределение температуры θ °C по поперечному сечению балки принимаем в соответствии с ближайшим по размеру профилем балки 400×600 мм по нормативному документу²³ при 120-минутном воздействии стандартного пожара (R 120) (рисунок 6). Усредненную температуру стержней рабочей арматуры в зоне действия температуры $\theta=430$ °C принимаем из работ²⁴ (см. рисунок 4). Она соответствует данным, полученным при испытании опытной балки.

¹⁹ См. сноску 18.

²⁰ Фёдоров В.Ю. Огнестойкость железобетонных балок с учетом их технического состояния в условиях эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Фёдоров Владимир Юрьевич; Академия Государственной противопожарной службы Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных действий РСФСР. – М., 2021 – 176 л.

²¹ См. сноски 18 и 20.

²² См. сноски 18 и 20.

²³ См. сноску 4.

²⁴ См. сноски 18 и 20.

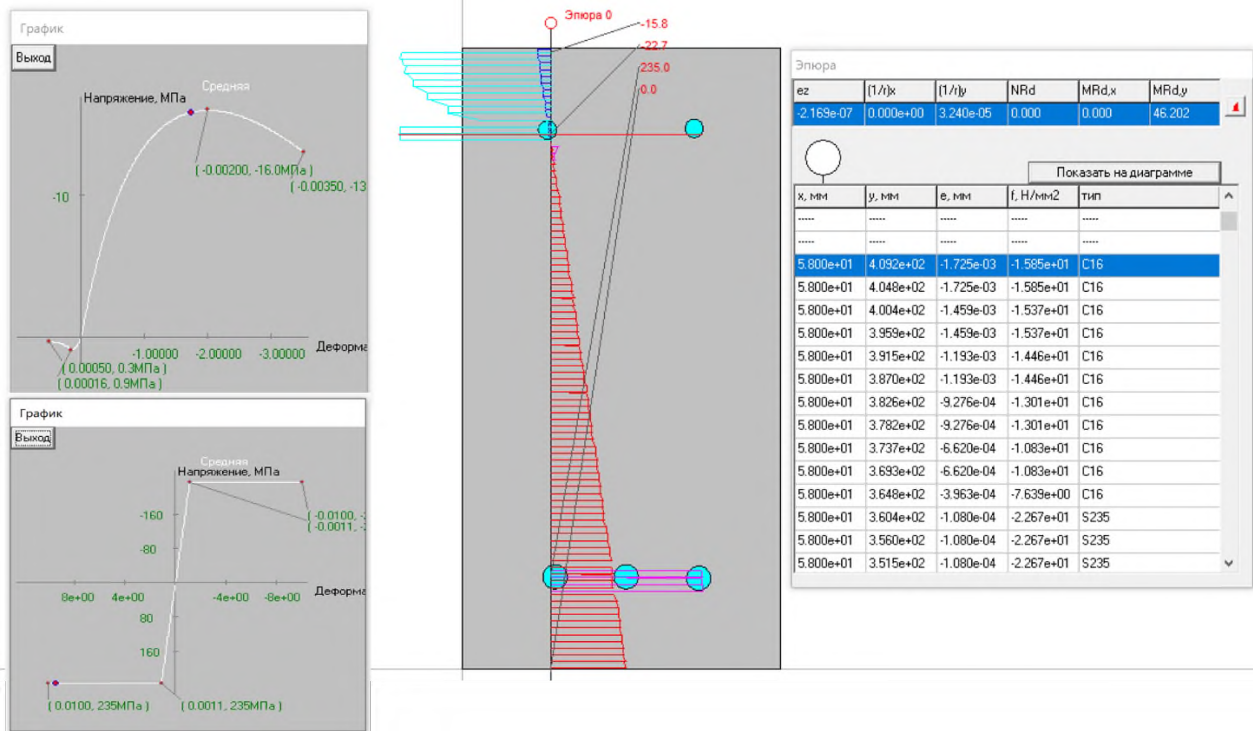


Рисунок 5. – Результаты вычисления предельного по прочности изгибающего момента балки в исходном состоянии при нормальной температуре

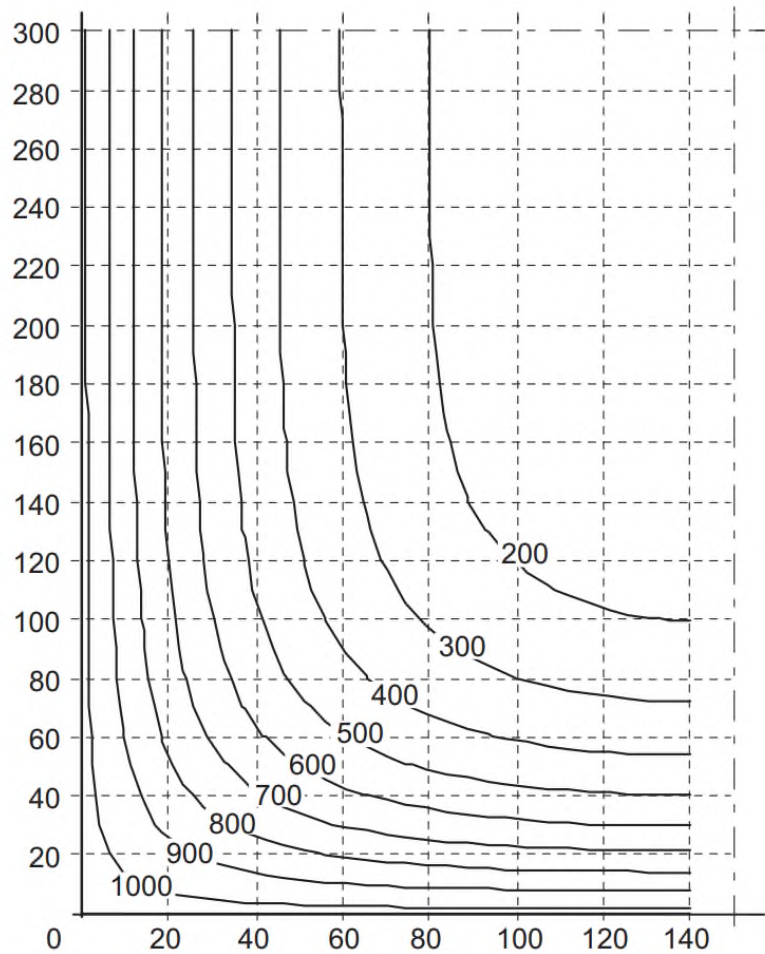


Рисунок 6. – Температурные профили балки $h \times b = 600 \times 300$ мм – R 120 [17]

Аппроксимации диаграмм деформирования бетона и арматуры с учетом влияния температурных воздействий на параметры базовых точек приведены на рисунке 7.

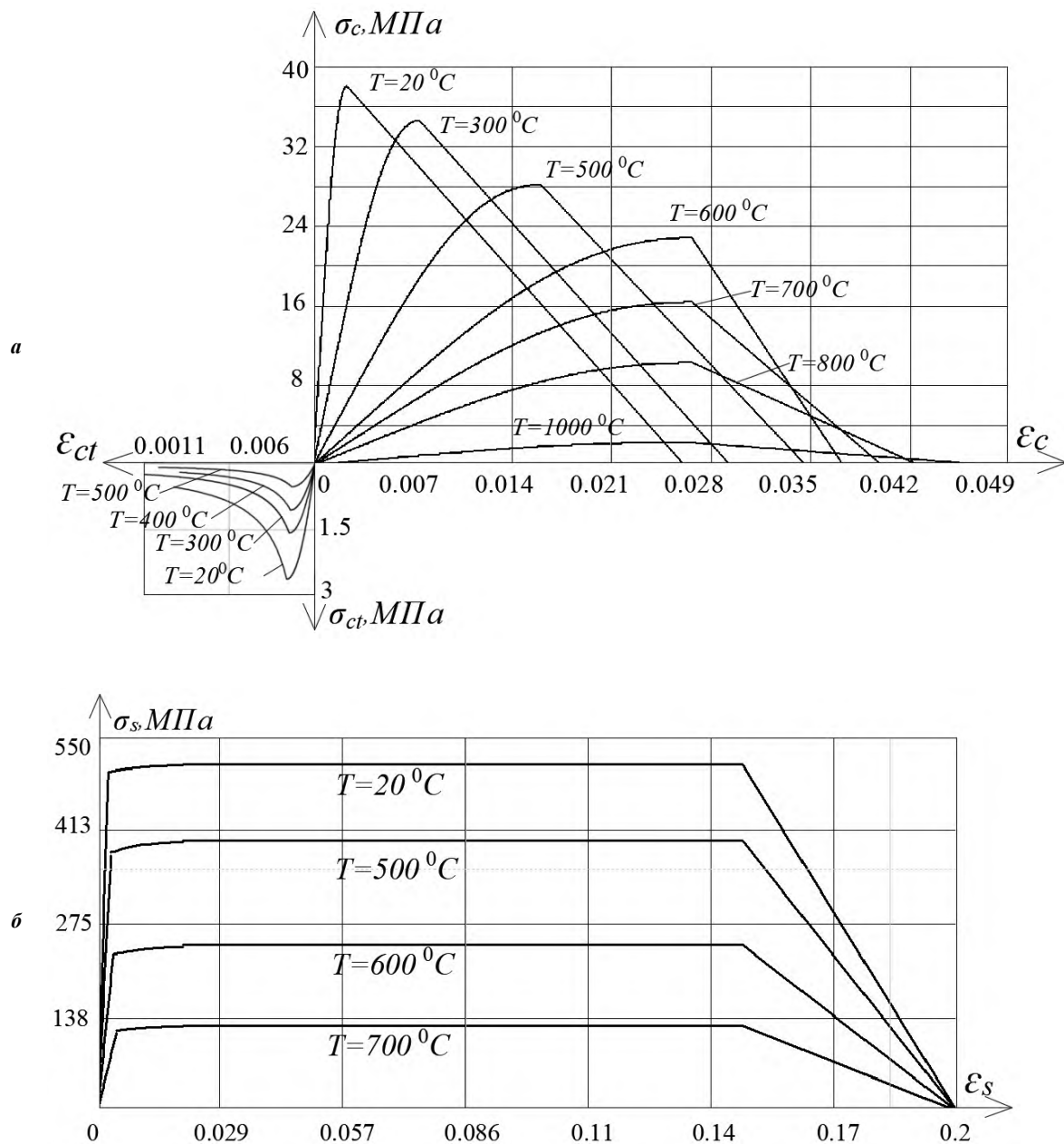


Рисунок 7. – Диаграммы деформирования при кратковременном нагружении и воздействии высоких температур бетона (а) и арматуры (б)

Вычисляем предельный по прочности изгибающий момент для рассматриваемой балки при стандартном воздействии пожара в течение $t=120$ мин (рисунок 8).

В результате расчета: $M_{ii}=37,589$ кНм $>$ 32,3 кНм. Дополнительный прогиб балки при характеристических значениях усилий ($\approx 0,7M_{ii}=32,3$ кНм) для равномерно распределенной нагрузки исходя из кривизны $1/r=2,747 \cdot 10^{-5}$ мм $^{-1}$ равен:

$$a_{\max, \theta} = \frac{5}{48} (2,417 \cdot 10^{-5}) \cdot 5800^2 - 11,6 = 73,1 \text{ мм.}$$

Это соответствует экспериментальному значению прогиба опытной балки при воздействии пожара в течение $t=120$ мин (см. рисунок 4). Расхождение составляет $[(73,1-70)/70] \cdot 100\% = 4,4\%$.

Аналогично выполняем расчет предельного по прочности изгибающего момента для рассматриваемой балки при стандартном воздействии пожара в течение $t=180$ мин (рисунок 9). Усредненную температуру стержней рабочей арматуры в зоне действия температуры $\theta=620$ °С принимаем из линейной экстраполяции графика усредненной температуры (см. рисунок 4).

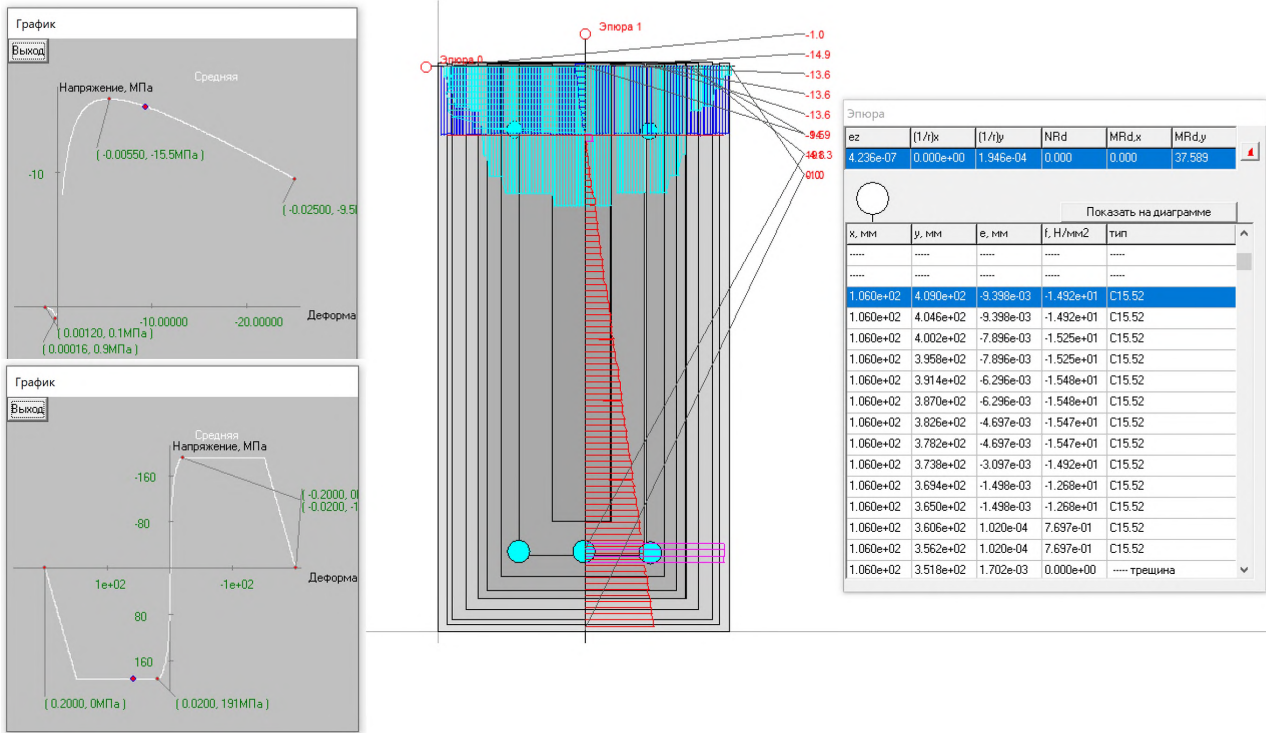


Рисунок 8. – Результаты вычисления предельного по прочности изгибающего момента балки при стандартном воздействии пожара в течение $t=120$ мин

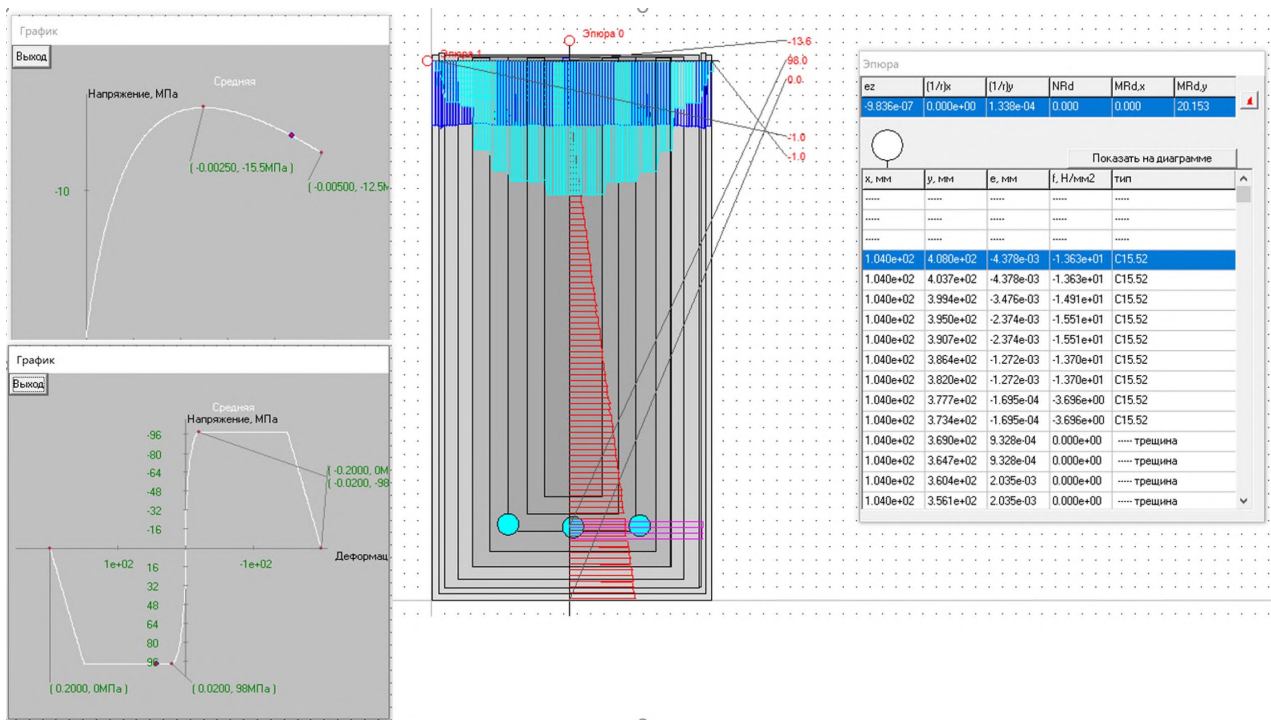


Рисунок 9. – Результаты вычисления предельного по прочности изгибающего момента балки при стандартном воздействии пожара в течение $t=180$ мин

В результате расчета предельное значение изгибающего момента при стандартном воздействии пожара в течение $t=180$ мин равно $M_u=20,153$ кНм $< 32,3$ кНм – разрушение балки с текучестью рабочей арматуры. Аналогично рекомендациям²⁵, вычисляем интерполяцией момент времени, когда фактическая несущая способность балки будет равна 32,3 кНм:

$$t_u = 120 + \frac{37,589 - 32,3}{37,589 - 20,153}(180 - 120) = 138,2 \text{ мин.}$$

Расхождение предела огнестойкости опытной балки²⁶, рассчитанного по предлагаемой методике на основе диаграмм деформирования бетона и арматуры²⁷ и нелинейной деформационной расчетной модели, с результатом эксперимента составляет $[(146 - 138,2)/138,2] \cdot 100\% = 5,6\%$.

Заключение. Проведенный анализ исследований показал, что высокая температура оказывает существенное влияние на параметры базовых точек диаграмм деформирования бетона и арматуры железобетонных элементов.

Вынужденные температурные деформации из-за разности коэффициентов температурных деформаций бетона и арматуры при действии высокой температуры вызывают дополнительные деформации растяжения бетона и деформации сжатия арматуры.

Применение нелинейной деформационной расчетной модели при известном распределении температуры $\theta(x, y)$ °С по поперечному сечению позволяет получать картину напряженно-деформированного состояния при воздействии усилий от внешней нагрузки (M_x, M_y, N) и высокой температуры, а также предельные внутренние усилия (M_{ux}, M_{uy}, N_u), воспринимаемые железобетонным элементом в рассматриваемом поперечном сечении.

Нелинейная деформационная расчетная модель дает возможность при заданной внешней нагрузке (M_x, M_y, N) и изменении распределения высокой температуры $\theta(x, y, t)$ °С по поперечному сечению с течением времени t получать предел времени сопротивления t_u железобетонного элемента силовому и температурному воздействию (огнестойкость).

На примере центрально сжатой железобетонной колонны круглого поперечного сечения продемонстрировано применение нелинейной деформационной расчетной модели для расчета параметров напряженно-деформированного состояния от вынужденных температурных деформаций.

Проведена верификация нелинейной деформационной расчетной модели при силовом и температурном воздействиях для расчета огнестойкости (t_u) железобетонной балки. Расхождение вычисленных параметров (прогиб, огнестойкость) для рассматриваемой балки с экспериментальными данными не превышает 5,6%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1998. – 224 с.
2. Некрасов К.Д., Жуков В.В., Гуляева В.Ф. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур. – М.: Стройиздат, 1972. – 128 с.
3. Кричевский А.П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия. – М.: Стройиздат, 1984. – 148 с.
4. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях: монография: в 2 ч. / под ред. С.Н. Леоновича и др. – Минск: БНТУ, 2016. – Ч. 1. – 393 с.
5. Поведение конструкционного бетона при высокой температуре: карбонизация, декарбонизация и рекарбонизация / С.Н. Леонович, Chao Feng, Miao Jijun и др. // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2023. – № 2(55). – С. 73–85.
6. Корсун В.И. Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций в условиях температурных воздействий. – Макеевка: ДонГАСА. – 2003. – 153 с.
7. Корсун В.И. Развитие методов расчета железобетонных конструкций зданий и сооружений на температурно-влажностные воздействия // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2021. – Т. 17, № 1. – С. 29–40.
8. Harada T., Takeda J., Ymane S. Strength, electricity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures // ACI SP 34: Concrete for Nuclear Reactors. – Detroit, 1972. – P. 377–406.
9. Mohanmedbhai G.T.G. Effect of exposure time and rated of heating and cooling on residual strength of heated concrete // Magazine of Concrete Research. – 1986. – № 3(136). – P.151–158.
10. Федоров В.С., Левитский В.Е. Специфика реакции бетона на воздействие высокой температуры // Строительство и реконструкция. – 2025. – № 6(122). – С. 47–59. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-122-6-47-59.
11. Махкамов Й.М., Мирзабабаева С.М. Температурные прогибы железобетонных балок в условиях воздействия технологических температур // Проблемы современной науки и образования. – 2019. – № 11-1(144). – С. 45–48.

²⁵ Рекомендации по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций / НИИЖБ. – М.: Стройиздат, 1986. – 40 с.

²⁶ См. сноски 18 и 20.

²⁷ См. сноску 4.

12. Корольченко Д.А., Артемьев Е.А. Расчет огнестойкости сжатых железобетонных элементов с учетом теплотехнических характеристик арматуры // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 6. – С. 37–41. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.06.37-41.
13. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Моисеенко Г.А. Диаграммы деформирования арматуры при совместном действии нагрузок и повышенных температур до +500°C // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 4(114). – С. 3–13. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-114-4-3-13.
14. Корсун В.И., Машталер С.Н. Влияние повышенных температур на прочность и деформации высокопрочного сталефибробетона при осевом сжатии и растяжении // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 6. – URL: <https://esj.today/PDF/76SAVN623.pdf>.
15. Камлюк А.Н., Полевода И.И., Ширко А.В. Модели материалов арматуры и бетона для теплотехнических и прочностных расчетов на примере российского стандарта // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – № 1(17). – С. 104–116.
16. Практическое моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при силовом и температурном воздействиях / Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов, А.М. Хаткевич и др. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2025. – № 2(41). – С. 2–12. DOI: 10.52928/2070-1683-2025-41-2-2-12.
17. Учет ползучести и усадки бетона по СП 5.03.01-2020 при расчете железобетонных конструкций на основе деформационной расчетной модели / Д.Н. Лазовский, В.В. Тур, Д.О. Глухов и др. // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – № 2(125). – С. 7–12. DOI: 10.36773/1818-1212-2021-125-2-7-12.

REFERENCES

1. Milovanov, A.F. (1998). *Ognestoikost' zhelezobetonnykh konstruksii*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
2. Nekrasov, K.D., Zhukov, V.V., & Gulyaeva, V.F. (1972). *Tyazhelyi beton v usloviyakh povyshennykh temperatur*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
3. Krichevskii, A.P. (1984). *Raschet zhelezobetonnykh inzhenernykh sooruzhenii na temperaturnye vozdeistviya*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
4. *Prochnost', treshchinostoikost' i dolgovechnost' konstruksionnogo betona pri temperaturnykh i korrozionnykh vozdeistviyakh: monografiya: v 2 ch. / pod red. S.N. Leonovicha i dr.* – Minsk: BNTU, 2016. – Ch. 1. (In Russ.).
5. Leonovich, S.N., Shao Feng, Miao Jijun i dr. (2023). Povedenie konstruksionnogo betona pri vysokoi temperature: karbonizatsiya, dekarbonizatsiya i rekarbonizatsiya. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*, 2(55), 73–85. (In Russ.).
6. Korsun, V.I. (2003). *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie zhelezobetonnykh konstruksii v usloviyakh temperaturnykh vozdeistvii*. Makeevka: DonGASA. (In Russ.).
7. Korsun, V.I. (2021). Razvitie metodov rascheta zhelezobetonnykh konstruksii zdaniy i sooruzhenii na temperaturno-vlazhnostnye vozdeistviya. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 17(1), 29–40. (In Russ.).
8. Harada, T., Takeda, J., & Ymane, S. (1972). Strength, electricity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures. *ACI SP 34: Concrete for Nuclear Reactors*, 377–406.
9. Mohanmedbhai, G.T.G. (1986). Effect of exposure time and rated of heating and cooling on residual strength of heated concrete. *Magazine of Concrete Research*, 3(136), 151–158.
10. Fedorov, V.S., & Levitskii, V.E. Spetsifika reaktsii betona na vozdeistvie vysokoi temperatury. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*, 6(122), 47–59. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-122-6-47-59.
11. Makhkamov, I.M., & Mirzababaeva, S.M. (2019). Temperaturnye progiby zhelezobetonnykh balok v usloviyakh vozdeistviya tekhnologicheskikh temperatur. *Problemy sovremennoi nauki i obrazovaniya*, 11-1(144), 45–48. (In Russ.).
12. Korol'chenko, D.A., & Artem'ev, E.A. (2020). Raschet ognestoikosti szhatykh zhelezobetonnykh elementov s uchetom teploekhnicheskikh kharakteristik armatury. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 6, 37–41. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.06.37-41. (In Russ.).
13. Karpenko, N.I., Karpenko, S.N., & Moiseenko, G.A. (2024). Diagrammy deformirovaniya armatury pri sovmestnom deistvii nagruzok i povyshennykh temperatur do +500°S. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*, 4(114), 3–13. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-114-4-3-13. (In Russ.).
14. Korsun, V.I., & Mashtaler, S.N. (2023). Vliyanie povyshennykh temperatur na prochnost' i deformatsii vysokoprochnogo stalefibrobetona pri osevom szhatii i rastyazhenii. *Vestnik evraziiskoi nauki*, 15(6). URL: <https://esj.today/PDF/76SAVN623.pdf> (In Russ.).
15. Kamlyuk, A.N., Polevoda, I.I., & Shirko, A.V. (2013). Modeli materialov armatury i betona dlya teplotekhnicheskikh i prochnostnykh raschetov na primere rossiiskogo standart. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 1(17), 104–116. (In Russ.).
16. Lazovskii, D.N., Glukhov, D.O., Khatkevich, A.M. i dr. (2025). Prakticheskoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh elementov pri silovom i temperaturnom vozdeistviyakh. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*, 2(41), 2–12. DOI: 10.52928/2070-1683-2025-41-2-2-12. (In Russ.).
17. Lazovskii, D.N., Tur, V.V., Glukhov, D.O. i dr. (2021). Uchet polzuchesti i usadki betona po SP 5.03.01-2020 pri raschete zhelezobetonnykh konstruksii na osnove deformatsionnoi raschetnoi modeli. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2(125), 7–12. DOI: 10.36773/1818-1212-2021-125-2-7-12. (In Russ.).

Поступила 19.02.2026

**CALCULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS
UNDER THE INFLUENCE OF LOAD AND HIGH TEMPERATURE**

D. LAZOUSKI¹⁾, D. GLUKHOV²⁾, A. KHATKEVICH³⁾, A. HIL⁴⁾, A. KALTUNOU⁵⁾, E. CHAPARANGANDA⁶⁾
(^{1), 3)-5) Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, ^{2) LLC «SoftClub», Minsk,}}
^{6) Botswana International University of Science and Technology)}

Methods for calculating the parameters of the stress-strain state of reinforced concrete elements under the influence of load and high temperature are constantly being improved. The nonlinear deformation calculation model for building structures (reinforced concrete, reinforced concrete, stone and reinforced stone, wooden) under force, temperature, humidity and long-term effects allows us to obtain the parameters of their stress-strain state at any stage of deformation, to take into account the physical nonlinearity of the materials, the stage of effects.

The analysis of studies of the influence of elevated (from 50 °C to 200 °C inclusive) and high (over 200 °C to 1400 °C) temperatures on the parameters of the base points of the diagrams of concrete deformation and reinforcement of reinforced concrete elements. Modeling of the stress-strain state of the reinforced concrete element was performed taking into account the forced temperature and humidity deformations of the materials. Verification of the proposed methodology for calculating the parameters of the stress-strain state of reinforced concrete elements under the influence of load and high temperature, as well as their fire resistance, has been carried out.

Keywords: *nonlinear deformation calculation model, stress-strain state, parameters of the base points of diagrams of deformation of concrete and reinforcement under the action of high temperatures, forced temperature deformations, calculation of fire resistance of reinforced concrete structures.*

УДК 691.32:620.173

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-25-33

**STUDY ON THE COMPRESSIVE MECHANICAL PROPERTIES
OF RECYCLED AGGREGATE EXPANSIVE CONCRETE****MIN HAO, Doctor of Technical Sciences, Professor V. TUR
(Brest State Technical University)**

Recycled aggregate concrete (RAC) is a promising low-carbon alternative to conventional concrete, yet its higher porosity and weaker interfacial transition zones (ITZs) often lead to reduced stiffness and increased deformation, which may amplify shrinkage-related serviceability risks. This study investigates the 28-day uniaxial compressive response of RAC incorporating a magnesium-oxide expansive agent (MEA) using a full factorial matrix. Twelve mixtures were prepared at a fixed water-to-binder ratio of 0.40 by crossing recycled coarse aggregate (RCA) replacement levels (0%, 30%, and 50%) with MEA dosages (0%, 6%, 8%, and 10% by binder mass). Cube specimens (100 mm) were tested under displacement control, and peak stress, peak strain, and static elastic modulus were obtained from the recorded load–deformation data; the modulus was evaluated by linear regression on the ascending branch within 0.2–0.5 of the peak stress. At 0% MEA, increasing RCA replacement decreased peak stress from 38.0 MPa to 33.4 MPa and reduced modulus from 32.0 GPa to 26.4 GPa, while peak strain increased from 1.75×10^{-3} to 2.30×10^{-3} . Across all RCA levels, MEA exhibited a non-monotonic effect: a modest improvement at 6% was followed by strength and stiffness reductions and higher peak strain at 8–10%, indicating a limited beneficial dosage window. The coupled trends suggest that deformation-related performance of MgO expansive RAC should be assessed using measured pairs of stiffness and strain capacity rather than peak stress alone. Given $n = 1$ per mixture at 28 days, the findings are interpreted as trend-based observations and motivate further replicated testing and microstructural verification.

Keywords: recycled aggregate concrete, MgO expansive agent, compressive strength, elastic modulus, peak strain.

Introduction. Driven by resource constraints and carbon reduction, recycled aggregate concrete (RAC) is widely regarded as a key pathway to the sustainability of cementitious materials; however, residual old mortar and a porous microstructure weaken the interfacial transition zone (ITZ), lower the elastic modulus, and increase sensitivity to shrinkage cracking, which continues to limit structural applications [1]. To improve volumetric stability and service reliability, the concept of expansive concrete has been adopted to use expansion to counteract shrinkage; among these systems, magnesium-oxide (MgO) expansive agents have seen systematic engineering application because their delayed expansion can be tailored, with long-standing practice and standards particularly in mass concrete and concrete-face rockfill dams in China [1].

From a materials mechanism perspective, the action of an MgO expansive agent centers on the hydration and crystal growth from MgO to Mg(OH)₂ (brucite), which occurs mainly in confined pores along pore walls and produces controllable delayed expansion; unlike CaO or calcium sulfoaluminate systems that rely on early ettringite formation, the rate and magnitude of expansion with a magnesium-oxide expansive agent are highly sensitive to particle reactivity, calcination conditions, curing temperature, and restraint [2]. Experimental studies and reviews further show that reactivity and dosage jointly define an effective window for compensating shrinkage and suppressing cracking; highly reactive MgO can compensate drying and autogenous shrinkage at early ages, whereas excessive dosage or a mismatch in reactivity may introduce diffuse microcracking and impair mechanical performance and durability [3].

Compared with normal concrete, the mechanical limitations of RAC are more closely tied to ITZ quality and the pore-size distribution; recent work has quantified the dominant roles of ITZ and pore structure in controlling compressive strength and stiffness and has indicated room for improvement through interfacial densification and internal curing [4]. Against this background, introducing an MgO expansive agent into RAC to balance volumetric stability with mechanical performance has become a recent focus, but much of the existing work targets shrinkage and cracking control in high-performance or specialized systems; under coupled conditions of RCA replacement and magnesium-oxide expansive-agent dosage, a systematic understanding of uniaxial compressive behavior, including the stress-strain response, elastic modulus, and peak strain, remains limited [5]. New reports also suggest that the optimum MgO dosage in recycled systems may shift with RCA content and curing regime, yet the quantitative laws and mechanisms that govern compressive constitutive behavior and stiffness deterioration or recovery still require clarification through a full-factorial test matrix [6].

Accordingly, this study examines recycled-aggregate concrete with an MgO expansive agent. A two-factor full matrix crossing RCA replacement levels of 0%, 30%, and 50% with magnesium-oxide expansive-agent dosages of 0%, 6%, 8%, and 10% was established at a fixed water-to-binder ratio; standard cube specimens were prepared, and compressive strength, stress-strain curves, elastic modulus, and peak strain were obtained. The aim is to elucidate the competing effects of RCA-induced weakening and densification or microcracking induced by the magnesium-oxide expansive agent under restraint, to identify an effective dosage window for MgO in recycled systems, and to provide practical recommendations that reconcile volumetric stability with compressive performance.

1. Materials and Methods

1.1 Materials

Ordinary Portland cement (P.O 42.5) conforming to GB 175 was used to ensure stable strength grade and consistent chemical composition across batches¹. Recycled coarse aggregate (RCA) was obtained from crushed demolition concrete. The source concrete was jaw-crushed, water-washed for 2 h to remove loose adhered mortar, oven-dried to constant mass, and then characterized for apparent density, water absorption, and flakiness index in accordance with GB/T 25177². Source of recycled coarse aggregate – Provided by Beijing Jingyulu Construction Engineering Co., Ltd., Natural coarse aggregate was continuously graded crushed stone (5–20 mm), and the fine aggregate was medium sand with a fineness modulus of 2.6 and silt content $\leq 2\%$. A polycarboxylate high-range water-reducing admixture was added at 1.0% of the binder mass to achieve comparable workability following JGJ/T 55³. The expansive component was a magnesium-oxide-based expansive agent (MEA) in powder form; the MgO content, fineness (or D50), and reactivity grade were provided by the manufacturer. MEA dosages were set to 0%, 6%, 8%, and 10% of the binder mass.



Figure 1. – Source of Recycled Coarse Aggregate

1.2 Mix design and experimental matrix

The water-to-binder ratio (w/b) was fixed at 0.40. A full two-factor matrix was adopted by crossing RCA replacement levels (0%, 30%, and 50%) with MEA dosages (0%, 6%, 8%, and 10%), yielding 12 mixtures denoted as R0–M0 to R50–M10 (Table 1). Mix proportions were designed in accordance with JGJ/T 55 to maintain comparable fresh consistency among mixtures⁴. The target testing ages (28 days) and the corresponding procedures were selected according to GB/T 50081⁵. The MEA dosage window (0–10% by binder mass) was selected to cover the commonly reported effective range for shrinkage compensation/volume stability while avoiding potential performance deterioration at excessive dosages, based on previous studies and reviews of MgO expansive systems [7–9].

Table 1. – Factorial mix matrix for recycled-aggregate MgO expansive concrete

Mix ID	RCA replacement (%)	MEA (MgO) dosage (% of binder)	w/b
R0-M0	0	0	0.40
R0-M6	0	6	0.40
R0-M8	0	8	0.40
R0-M10	0	10	0.40
R30-M0	30	0	0.40
R30-M6	30	6	0.40
R30-M8	30	8	0.40
R30-M10	30	10	0.40
R50-M0	50	0	0.40
R50-M6	50	6	0.40
R50-M8	50	8	0.40
R50-M10	50	10	0.40

Notes. RCA replacement \times MEA dosage; w/b = 0.40; mix IDs R0–M0 to R50–M10.

¹ State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration GB 175-2023 General Portland Cement. – 2023. URL: https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/GB175-2023?English_GB%20175-2023.

² General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, China National Standardization Administration GB/T 25177-2010 Recycled Coarse Aggregates for Concrete. – 2010. URL: <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GBT25177-2010>.

³ The Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China JGJ 55-2011 Code for Design of Ordinary Concrete Mix Proportion. – 2011. URL: <https://www.doc88.com/p-7059188863793.html>.

⁴ See footnote 3.

⁵ The Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China GB/T 50081-2019 Standard for Test Methods of Physical and Mechanical Properties of Concrete. – 2019. URL: <https://ebook.chinabuilding.com.cn/zbooklib/bookpdf/probation?SiteID=1&bookID=114599>.

1.3 Specimen preparation and curing

All mixtures were produced using a pan mixer. Coarse and fine aggregates were first dry blended with cement and MEA to achieve a uniform distribution of powders and aggregates. Gauging water pre-mixed with the polycarboxylate superplasticizer was then added, and the mixtures were remixed until a homogeneous consistency was obtained. Fresh concrete was cast into $100 \times 100 \times 100$ mm steel molds and compacted using table vibration to minimize entrapped air. The specimen was demolded after the initial setting was completed. And cured in a standard curing room at 20 ± 2 °C and relative humidity $\geq 95\%$ until testing at target ages of, 28 days, in accordance with GB/T 50081⁶. For each mixture and age, $n = 1$ specimen was tested; therefore, all reported values correspond to single measurements, and the experimental scatter was not quantified in this study.

1.4 Compression testing and instrumentation

Uniaxial compression tests were conducted on a servo-hydraulic compression testing frame under displacement control at $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. The loading platens were lapped, and a small seating preload was applied before formal loading. Load and axial deformation were continuously recorded. Axial deformation was measured using two opposed LVDTs mounted at mid-height of the specimen. The axial strain was obtained from the average LVDT extension divided by the gauge length L_0 , where $L_0 \geq 50$ mm, consistent with GB/T 50081⁷. Engineering stress–strain curves were constructed for each specimen.



Figure 2. – Example of Servo Hydraulic Compression Testing Machine

1.5 Data reduction and definitions of reported variables

To ensure traceability of the reported response variables, peak stress, peak strain, and static elastic modulus were calculated from the recorded load–deformation data using the following definitions.

(1) Engineering compressive stress and peak stress.

Engineering compressive stress was calculated as

$$\sigma = A \div P, \quad (1)$$

where P is the instantaneous load (N) and A is the loaded area (mm^2). For 100 mm cube specimens, $A \approx 100 \times 100 = 10,000 \text{ mm}^2$ (or calculated using the measured face dimensions). The peak stress (reported as Peak Stress, MPa) was defined as

$$\sigma_{\max} = \max(\sigma). \quad (2)$$

Note that $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$.

(2) Axial strain and peak strain.

Axial strain was calculated as

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_{\text{avg}}}{L_0}, \quad (3)$$

where ΔL_{avg} is the mean deformation from two opposed LVDTs and L_0 is the gauge length. Peak strain ε_{\max} was defined as the axial strain corresponding to σ_{\max} . For reporting convenience, peak strain was presented as $\varepsilon_{\max} \times 10^3 (\times 10^{-3})$.

⁶ See footnote 5.

⁷ See footnote 5.

(3) Static elastic modulus.

The static elastic modulus E was evaluated on the ascending branch of the engineering stress–strain curve. For each specimen, the peak stress σ_{\max} was first determined, and all data points $(\varepsilon_i, \sigma_i)$ satisfying

$$0.2\sigma_{\max} \leq \sigma_i \leq 0.5\sigma_{\max} \quad (4)$$

were selected. The modulus E was then obtained as the slope of the least-squares linear regression of σ against ε within this interval:

$$\sigma = a + E\varepsilon, \quad (5)$$

where a is the regression intercept and E is the regression slope. When σ is in MPa and ε is dimensionless, E is obtained in MPa and was converted to GPa by dividing by 1000. This “windowed” evaluation provides a reproducible static modulus and aligns with the customary working-stress concept used in ASTM C469/C469M, while differing from its standard two-point chord definition and specimen geometry⁸.

2. Results

2.1 Compressive strength (peak stress at 28 d)

The 28-day compressive response is reported in terms of peak stress (σ_{\max}), defined as the maximum engineering stress obtained from the recorded load divided by the loaded area (Section 2.5).

Table 2. – Peak stress (σ_{\max}) of recycled-aggregate concrete with MgO expansive agent at 28 days

RCA replacement (%)	MEA dosage (% of binder)	Peak stress, σ_{\max} (MPa)
0	0	38.0
0	6	39.2
0	8	36.5
0	10	34.1
30	0	36.1
30	6	37.2
30	8	34.7
30	10	32.5
50	0	33.4
50	6	34.4
50	8	32.1
50	10	30.1

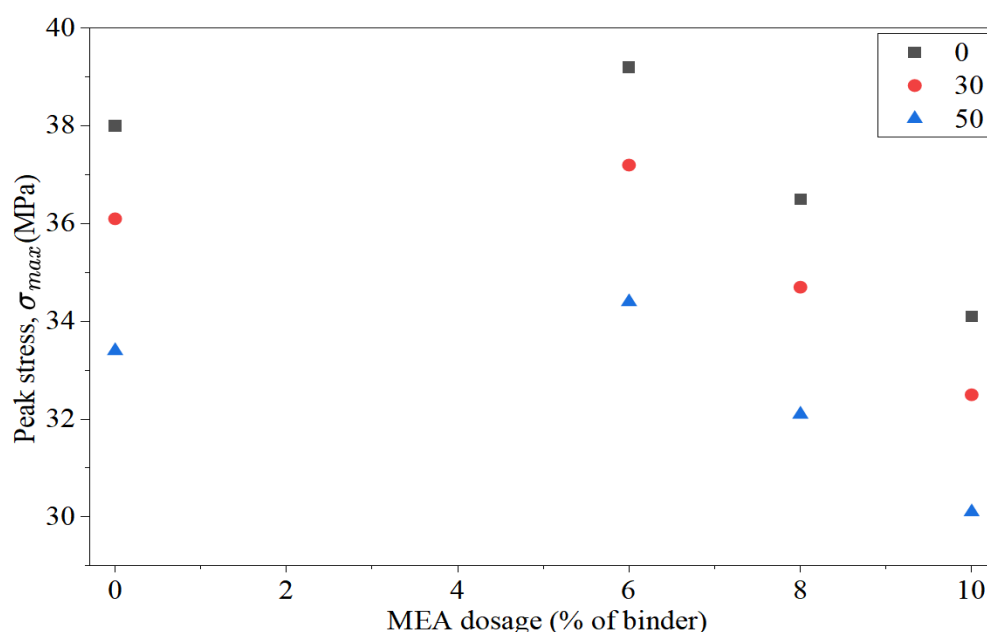


Figure 3. – Peak stress (σ_{\max}) of recycled-aggregate concrete with MgO expansive agent at 28 days

⁸ ASTM International. ASTM C469/C469M-22: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression. – 2022. URL: https://store.astm.org/c0469_c0469m-22.html.

The results are summarized in Table 2 and illustrated in Figure 3. At a fixed water–binder ratio, σ_{\max} is primarily governed by the RCA replacement level: with 0% MEA, σ_{\max} declines from 38.0 MPa at 0% RCA to 36.1 MPa at 30% RCA and 33.4 MPa at 50% RCA (Table 2; Figure 3), which is consistent with widely reported behavior of recycled-aggregate concrete. At any RCA level, MEA shows a non-monotonic dosage effect: σ_{\max} exhibits a slight increase at 6% MEA and then decreases at 8% and 10% MEA. For example, at 0% RCA the values are 38.0, 39.2, 36.5, and 34.1 MPa at 0%, 6%, 8%, and 10% MEA, respectively; corresponding trends are observed at 30% and 50% RCA (Table 2; Figure 3).

At 0% MEA, σ_{\max} decreases with increasing RCA replacement, from 38.0 MPa at 0% RCA to 36.1 MPa at 30% RCA and 33.4 MPa at 50% RCA (Table 2; Figure 3). This monotonic reduction agrees with widely reported behavior of recycled-aggregate concrete, where adhered old mortar and a generally weaker interfacial transition zone tend to reduce compressive performance as RCA content increases [10].

For a given RCA level, MEA shows a non-monotonic dosage effect. A 6% MEA dosage is associated with a modest increase in σ_{\max} relative to 0% MEA, whereas 8% and 10% MEA lead to lower σ_{\max} in all RCA series. Specifically, at 0% RCA, σ_{\max} equals 38.0, 39.2, 36.5, and 34.1 MPa at 0%, 6%, 8%, and 10% MEA, respectively; at 30% RCA the corresponding values are 36.1, 37.2, 34.7, and 32.5 MPa; and at 50% RCA they are 33.4, 34.4, 32.1, and 30.1 MPa. Such an “optimum-at-moderate-dosage” response is consistent with the general understanding that MgO-based expansive systems can be beneficial within an appropriate dosage/reactivity window, while excessive expansion may introduce internal damage and reduce peak stress; however, the mechanistic interpretation should be regarded as qualitative in the absence of replicate specimens [1; 7; 8].

2.2 Elastic modulus (28 d)

The static elastic modulus E was evaluated from the ascending branch of the engineering stress–strain curve by ordinary least-squares regression within 0.2–0.5 σ_{\max} , as defined in Section 2.5. Because $n = 1$ for each mixture at 28 d, the values in Table 3 and Figure 4 represent single measurements and are interpreted primarily through consistent trends across the factorial matrix.

As shown in Table 3 and Figure 4, the elastic modulus decreases with increasing RCA replacement. At 0% MEA, E declines from 32.0 GPa (0% RCA) to 28.8 GPa (30% RCA) and 26.4 GPa (50% RCA), which is consistent with the generally reduced stiffness reported for recycled-aggregate concrete due to the higher proportion of adhered old mortar and the altered interfacial transition zones [10].

For a given RCA level, MEA exhibits a limited “moderate-dosage” window. At 0% RCA, E increases slightly from 32.0 GPa (0% MEA) to 32.5 GPa at 6% MEA, and then decreases to 30.4 GPa (8% MEA) and 28.8 GPa (10% MEA). Similar behavior is observed at 30% RCA, where E reaches 29.3 GPa at 6% MEA before decreasing to 27.4 GPa and 25.9 GPa at 8% and 10% MEA, respectively. At 50% RCA, E is unchanged between 0% and 6% MEA (26.4 GPa), but decreases at higher dosages (25.1 GPa at 8% and 23.8 GPa at 10%). These results are consistent with the general understanding that MgO-based expansive systems can be beneficial within an appropriate dosage/reactivity range, whereas excessive expansion may introduce internal damage that preferentially reduces stiffness [1; 8].

Notably, the modulus reduction at higher MEA dosages is coherent with the concurrent increase in peak strain discussed in the next section, indicating a transition toward a more deformable response near peak when MEA is excessive (see Table 3 and Figure 4).

Table 3. – Elastic modulus (E) of recycled-aggregate concrete with MgO expansive agent at 28 days

RCA replacement (%)	MEA dosage (% of binder)	Elastic modulus, E (GPa)
0	0	32.0
0	6	32.5
0	8	30.4
0	10	28.8
30	0	28.8
30	6	29.3
30	8	27.4
30	10	25.9
50	0	26.4
50	6	26.4
50	8	25.1
50	10	23.8

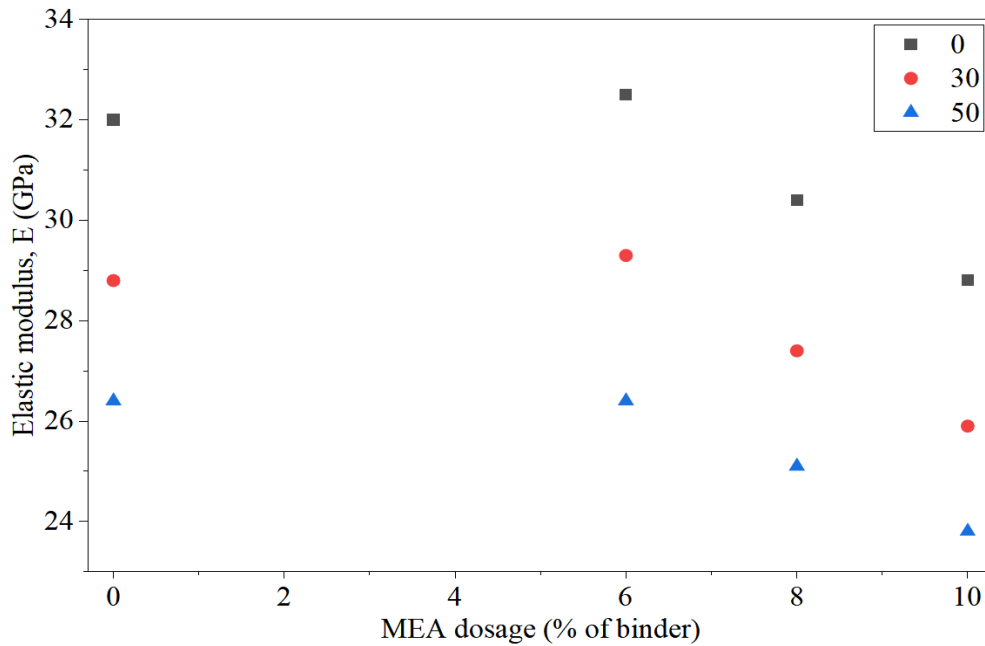


Figure 4. – Elastic modulus (E) of recycled-aggregate concrete with MgO expansive agent at 28 days

2.3 Peak strain (28 d)

Peak strain ϵ_{\max} is defined as the axial strain corresponding to the peak stress σ_{\max} on the engineering stress–strain curve. For reporting convenience, ϵ_{\max} is presented in $\times 10^{-3}$. Because $n = 1$ for each mixture at 28 d, the values reported in Table 4 and Figure 5 represent single measurements and are interpreted through consistent trends across the matrix.

As shown in Table 4 and Figure 4, peak strain increases with RCA replacement. At 0% MEA, ϵ_{\max} increases from 1.75×10^{-3} (0% RCA) to 2.05×10^{-3} (30% RCA) and 2.30×10^{-3} (50% RCA). This trend is compatible with published observations that recycled-aggregate concrete often exhibits greater deformability under compression due to higher heterogeneity and the presence of adhered mortar and multiple ITZs, which can promote earlier nonlinear deformation [11].

Within each RCA level, MEA dosage produces a distinct response: ϵ_{\max} is unchanged or slightly lower at 6% MEA (e.g., 1.70×10^{-3} at 0% RCA; 2.00×10^{-3} at 30% RCA; 2.25×10^{-3} at 50% RCA), but increases at 8% and 10% MEA. For example, at 50% RCA, ϵ_{\max} rises from 2.25×10^{-3} (6% MEA) to 2.50×10^{-3} (8% MEA) and 2.70×10^{-3} (10% MEA). The simultaneous increase in peak strain and the reduction in modulus at higher MEA dosages indicates a shift toward a more deformable response near peak when MEA is excessive. A plausible explanation is that over-expansion under restraint may introduce distributed micro-defects that reduce stiffness and allow larger inelastic deformation before peak stress, although this mechanistic interpretation should be regarded as qualitative given the single-specimen nature of the dataset [7; 8].

From a practical perspective, these results highlight that serviceability-related parameters (stiffness and strain capacity) may not be inferred from peak stress alone for MgO expansive recycled-aggregate concrete; therefore, it is advisable to consider measured pairs of E and ϵ_{\max} when comparing mixtures and assessing deformation-related performance (Table 3 and Table 4; Figure 3 and Figure 5).

Table 4. – Peak strain (ϵ_{\max}) of recycled-aggregate concrete with MgO expansive agent at 28 days

RCA replacement (%)	MEA dosage (% of binder)	Peak strain, ϵ_{\max} ($\times 10^{-3}$)
0	0	1.75
0	6	1.70
0	8	1.85
0	10	2.00
30	0	2.05
30	6	2.00
30	8	2.20
30	10	2.40
50	0	2.30
50	6	2.25
50	8	2.50
50	10	2.70

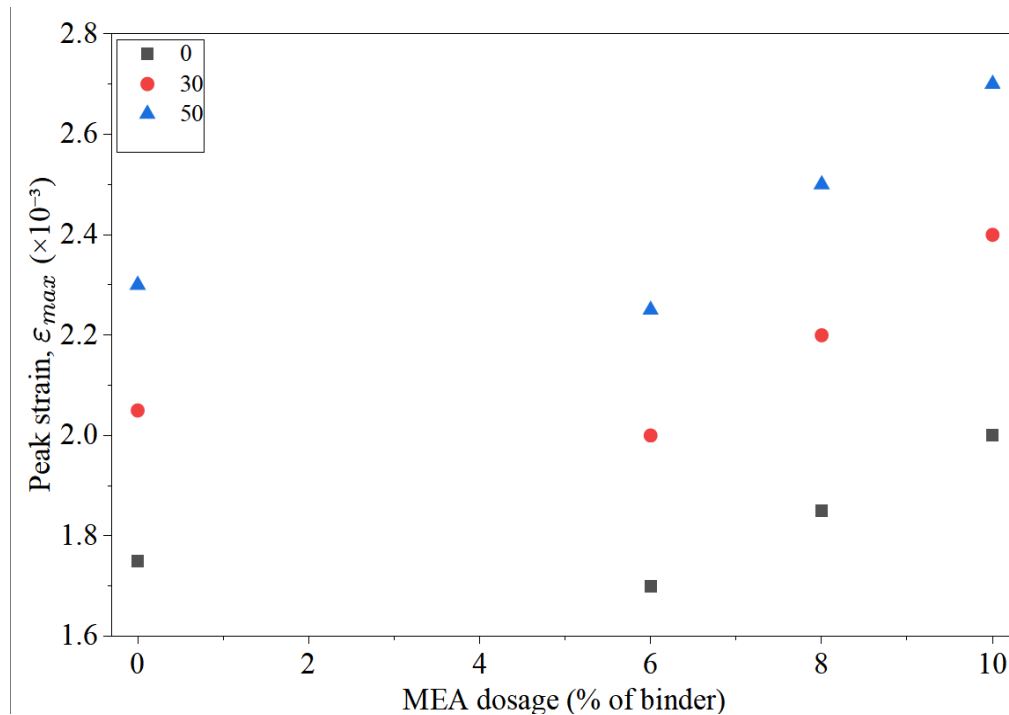


Figure 5. – Peak strain (ϵ_{max}) of recycled-aggregate concrete with MgO expansive agent at 28 days

Discussion. At a constant $w/b = 0.40$, the coupled trends of peak stress, elastic modulus, and peak strain indicate that the dominant mechanical penalty originates from RCA replacement, while MEA mainly modulates the response within a limited dosage window. As RCA increases, the reduction in peak stress and stiffness is consistent with the generally higher porosity and heterogeneity introduced by adhered old mortar and the presence of multiple interfacial transition zones in recycled aggregate systems [12]. In parallel, the larger peak strain observed at higher RCA levels agrees with published uniaxial compression observations that RAC tends to exhibit reduced modulus and increased deformation capacity at comparable strength, reflecting earlier nonlinear deformation development under compression [13].

Within each RCA level, MEA shows an evident “moderate-benefit / excessive-penalty” pattern: a small recovery in peak stress (and in some cases modulus) at 6% MEA is followed by reductions at 8–10% MEA. This behavior is compatible with the concept that MgO hydration products (brucite) can provide restrained expansion and local pore refinement when dosage and reactivity are appropriate, but may generate distributed micro-defects or expansion-induced microcracking when expansion becomes excessive, thereby reducing stiffness and strength while permitting larger peak strain [14]. The mechanistic plausibility is supported by microstructural and pore-scale discussions that link brucite growth pressure and confinement effects to expansion behavior and strength sensitivity [7]. Recent studies on MgO expansion agents further emphasize that the stable performance of MEA is strongly dosage- and activity-dependent, and that excessive contents can deteriorate volume stability and microstructure, which aligns qualitatively with the stiffness loss and strain increase at higher MEA dosages in the present matrix [15].

From a design and interpretation standpoint, the joint reading of $(\sigma_{max}, E, \epsilon_{max})$ suggests that peak stress alone is insufficient to represent deformation-related performance for MgO expansive RAC, particularly when MEA exceeds the moderate range and stiffness becomes more sensitive than strength. Because each 28 d result corresponds to $n = 1$, the discussion should be framed as a trend-based interpretation across a consistent factorial matrix rather than a statistically validated conclusion; accordingly, the present results are best positioned as an initial mechanical mapping that motivates future replication (≥ 3 specimens per mix-age) and complementary evidence (e.g., MIP/SEM or restrained expansion/shrinkage measurements) to confirm whether the inferred micro-defect/ITZ mechanisms are indeed governing the stiffness–strain shifts.

Conclusion. At 28 days and $w/b = 0.40$, RCA replacement set the baseline mechanical level. Without MEA, peak stress decreased from 38.0 MPa (0% RCA) to 36.1 MPa (30% RCA) and 33.4 MPa (50% RCA), while the elastic modulus dropped from 32.0 GPa to 28.8 GPa and 26.4 GPa; peak strain increased from 1.75×10^{-3} to 2.05×10^{-3} and 2.30×10^{-3} . These coupled changes indicate a progressively more compliant and deformable compressive response as RCA content increased.

MEA showed a limited beneficial dosage range. A 6% dosage produced a small strength recovery across all RCA levels, whereas 8–10% generally reduced strength and stiffness and increased peak strain. This combination points to a trade-off: higher MEA dosages may increase deformation capacity near peak but at the expense of stiffness and, in several mixes, peak stress.

For interpretation and mixture selection, peak stress alone does not capture the deformation-related response of MgO expansive RAC. Reporting and comparing mixtures using the paired indicators (E , ε_{\max}) together with σ_{\max} is more informative, especially when MEA exceeds the moderate range. Because $n = 1$ for each mix at 28 days, the findings should be treated as trend-based observations that require replicated testing to quantify variability.

REFERENCES

1. Mo L., Deng M., Tang M., Al-Tabbaa A. MgO expansive cement and concrete in China: Past, present and future // *Cement and Concrete Research*. – 2014. – Vol. 57. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.12.007.
2. Cao F., Miao M., Yan P. Hydration characteristics and expansive mechanism of MgO expansive agents // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 183. – P. 234–242. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.164.
3. Influence of reactivity and dosage of MgO expansive agent on shrinkage and crack resistance of face slab concrete / L. Wang, G. Li, X. Li et al. // *Cement and Concrete Composites*. – 2022. – Vol. 126. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104333.
4. Influence of interfacial transition zones (ITZs) and pore structure on the compressive strength of recycled aggregate concrete / C. Lu, Q. Yu, J. Wei et al. // *Construction and Building Materials*. – 2024. – Vol. 456. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139299.
5. Mechanical performance and autogenous and drying shrinkage of MgO-based recycled aggregate high-performance concrete / V. Revilla-Cuesta, L. Evangelista, J. de Brito et al. // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 314(3). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125726.
6. Cao H., Wu B. Strength development of MgO recycled aggregate concrete with recycled sand from WRSR and compressive behavior of recycled lump-aggregate concrete // *Journal of Building Engineering*. – 2024. – № 95(03). DOI: 10.1016/j.jobeb.2024.110336.
7. Zhang J. Recent advance of MgO expansive agent in cement and concrete // *Journal of Building Engineering*. – 2022. – Vol. 45. DOI: 10.1016/j.jobeb.2021.103633.
8. Gu L., Qin X., Feng J. Experimental studies on the volume stability of MgO expansion agent in concrete // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 79. DOI: 10.1016/j.jobeb.2023.107866.
9. Mitigating shrinkage in ultra-high-performance concrete using MgO expansion agents with different activity levels / Z. Zhang, S. Li, P. Chen et al. // *Frontiers in Materials*. – 2022. – Vol. 9. DOI: 10.3389/fmats.2022.1033467.
10. Silva R.V., de Brito J., Dhir R.K. The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: A review // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2015. – Vol. 19(7). – P. 825–849. DOI: 10.1080/19648189.2014.974831.
11. Xiao J., Zhang K., Akbarnezhad A. Variability of stress-strain relationship for recycled aggregate concrete under uniaxial compression loading // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 181. – P. 753–771. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.247.
12. Le H.-B., Bui Q.-B. Recycled aggregate concretes—a state-of-the-art from the microstructure to the structural performance // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 257. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119522.
13. Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches / W. Li, J. Xiao, Z. Sun et al. // *Construction and Building Materials*. – 2012. – Vol. 35. – P. 1045–1055. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.022.
14. Uniaxial compressive stress–strain relation of recycled coarse aggregate concrete with different carbonation depths / K. Tu, J. Wu, Y. Wang et al. // *Materials*. – 2022. – Vol. 15(15). DOI: 10.3390/ma15155429.
15. Use of MgO expansion agent to compensate concrete shrinkage in jointed reinforced concrete pavement under high-altitude environmental conditions / K. Huang, X. Shi, D. Zollinger et al. // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 202. – P. 528–536. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.041.

Поступила 10.01.2026

ВЛИЯНИЕ МАГНЕЗИАЛЬНОЙ РАСШИРЯЮЩЕЙ ДОБАВКИ НА РАБОТУ ПРИ СЖАТИИ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА БЕТОНА НА ВТОРИЧНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ

МИНЬ ХАО,

д-р техн. наук, проф. В.В. ТУР

(Брестский государственный технический университет)

Переработанный агрегатный бетон (РАС) является перспективной альтернативой обычному бетону с низким содержанием углерода, однако его более высокая пористость и более слабые интерфейсные переходные зоны (ITZ) часто приводят к снижению жесткости и увеличению деформации, что может усилить риски обслуживания, связанные с сужением. В этом исследовании изучается 28-дневная одноосная реакция на сжатие РАК, включающая в себя экспансионный агент оксида магния (МЭА) с использованием полной факториальной матрицы. Двенадцать смесей были приготовлены при фиксированном соотношении воды к связывающему веществу в размере 0,40 путем пересечения уровней замены переработанного грубого агрегата (РКА) (0%, 30% и 50%) с дозами МЭА (0%, 6%, 8% и 10% по массе связывающего вещества). Кубические образцы (100 мм) были испытаны под контролем смещения, а пиковое напряжение, пиковая деформация и статический модуль эластичности были получены из зарегистрированных данных нагрузки-деформации; модуль был оценен линейной регрессией на

восходящей ветви в пределах 0,2–0,5 пикового напряжения. При 0% МЭА увеличение замены РСА уменьшило пиковое напряжение с 38,0 МПа до 33,4 МПа и уменьшило модуль с 32,0 GPa до 26,4 GPa, в то время как пиковое напряжение увеличилось с $1,75 \times 10^{-3}$ до $2,30 \times 10^{-3}$. На всех уровнях РКА МЭА демонстрировал немонотонный эффект: за скромным улучшением на 6% последовало снижение прочности и жесткости и более высокое пиковое напряжение на 8–10%, что указывает на ограниченное полезное окно дозировки. Совместные тенденции предполагают, что характеристики, связанные с деформацией MgO экспансивного РАС, следует оценивать с использованием измеренных пар жесткости и нагрузочной способности, а не только пикового напряжения. Учитывая, что $n = 1$ на смесь в течение 28 дней, результаты интерпретируются как наблюдения, основанные на тенденциях, и мотивируют дальнейшее повторное тестирование и микроструктурную проверку.

Ключевые слова: переработанный агрегатный бетон, MgO экспансивный агент, прочность к сжатию, модуль эластичности, пиковое напряжение.

УДК 624.058.2:69:004

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-34-41

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ НАД АВТОМОБИЛЬНЫМ ПАРКИНГОМ СОВМЕСТНО С ВІМ-ТЕХНОЛОГИЯМИ

*Е.Н. САВИНА, д-р техн. наук, доц. Е.А. МОЙСЕЙЧИК,
А.А. ЯКОВЛЕВ, А.В. КУЛАН*

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

В условиях реконструкции и изменения функционального назначения зданий актуальной инженерной задачей является достоверная оценка фактической несущей способности железобетонных перекрытий. В статье представлен опыт интеграции лазерного и фотограмметрического сканирования с ВІМ-технологией при проведении натурных испытаний фрагмента монолитной железобетонной плиты перекрытия над подземным автомобильным паркингом. В рамках исследования выполнены натурные испытания перекрытия с поэтапным статическим нагружением. Для формирования геометрических исходных данных использованы беспилотный летательный аппарат, мобильные телефоны, наземный лазерный сканер. По результатам сканирования получены облака точек, на основе которых сформирована информационная модель объекта с учетом фактического положения несущих конструкций и выявленных геометрических отклонений от проектных значений. С использованием уточненной расчетной схемы выполнен расчет напряженно-деформированного состояния железобетонного перекрытия и определена его фактическая несущая способность с учетом проектных и эксплуатационных нагрузок. В ходе строительно-монтажных работ потребовалась корректировка проектных решений, связанная с изменением схемы и величины приложения нагрузок, что было оперативно учтено за счет применения цифровой информационной модели. Показано, что использование сканирования и ВІМ-технологий при натурных испытаниях позволяет повысить адекватность расчетных моделей, уменьшить сроки принятия решений и обеспечить сокращение времени ввода объекта в эксплуатацию. Полученные результаты подтверждают перспективность применения цифровых методов при обследовании, испытаниях и эксплуатации железобетонных конструкций.

Ключевые слова: *ВІМ-технологии, цифровая модель объекта, виртуальная реальность, расчётная схема, железобетонная плита перекрытия, сканирование объекта, БПЛА, облако точек, напряженно-деформированное состояние.*

Введение. В условиях высокой плотности застройки крупных городов и ограниченности свободных территорий для нового строительства все более широкое распространение получает освоение подземного пространства, в том числе для размещения автомобильных паркингов [1; 2]. При эксплуатации таких объектов нередко возникает необходимость изменения функционального назначения помещений, расположенных над подземными уровнями. Так, офисные помещения первых этажей могут перепрофилироваться под торговые, складские или общественные зоны, что приводит к увеличению эксплуатационных нагрузок и изменению схем их приложения к конструкциям перекрытий [3; 4]. Изменение функционального назначения помещений требует подтверждения фактической несущей способности конструкций, так как проектные решения, принятые на стадии разработки, могут не соответствовать новым условиям эксплуатации. В подобных ситуациях возникает необходимость выполнения технического обследования, расчетного обоснования, а в ряде случаев – натурных испытаний железобетонных конструкций для оценки их напряженно-деформированного состояния и эксплуатационной надежности [5].

Традиционные методы обследования и расчетного анализа, основанные на проектной документации и выборочных измерениях, не всегда позволяют с достаточной точностью учитывать фактическое геометрическое положение конструктивных элементов, наличие отклонений от проектных отметок и взаимное расположение несущих элементов. Указанные факторы могут оказывать существенное влияние на расчетную схему и результаты определения напряжений и деформаций в железобетонных конструкциях [6; 7].

В последние годы активно развиваются технологии лазерного и фотограмметрического сканирования, позволяющие получать пространственные данные об объектах строительства в виде облаков точек. Интеграция результатов сканирования с ВІМ-технологиями создает предпосылки для формирования цифровых информационных моделей, адекватно отражающих фактическое состояние сооружений и позволяющих уточнять расчетные схемы при выполнении расчетов [8–10].

Несмотря на наличие отдельных исследований в данной области [11–18], вопросы практического применения облаков точек при проведении натурных испытаний несущих железобетонных конструкций остаются формальными, особенно в части их использования для корректировки расчетной схемы.

Основная часть. Целью настоящего исследования является обоснование возможности применения лазерного и фотограмметрического сканирования в составе ВІМ-технологий для повышения достоверности результатов натурных испытаний железобетонного перекрытия и уточнения его фактической несущей способности на примере подземного автомобильного паркинга.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

– выполнен сбор пространственных геометрических данных фрагмента перекрытия с применением различных средств сканирования;

- сформирована цифровая информационная модель объекта на основе облака точек;
- уточнена расчетная схема железобетонного перекрытия с учетом фактического положения несущих элементов;
- проведены натурные испытания с поэтапным статическим нагружением;
- выполнена оценка напряженно-деформированного состояния конструкций при изменении схемы и величины эксплуатационных нагрузок.

Исследования выполнены на фрагменте железобетонного перекрытия здания многофункционального комплекса с подземным паркингом, расположенного в г. Минске. Здание шестиэтажное, в плане имеет прямоугольную форму. Конструктивная схема здания – пространственная, многоярусная, с монолитным железобетонным каркасом и безбалочными плитами перекрытий.

Подземный уровень используется в качестве автомобильного паркинга. Перекрытие над паркингом одновременно выполняет функции несущей конструкции и основания для размещения помещений общественного и торгового назначения, расположенных на отметке 0.000. Рельеф местности по периметру характеризуется значительными перепадами высот, вблизи сооружения организовано движение автотранспортных средств, что обуславливает дополнительные эксплуатационные воздействия.

Объектом натурных испытаний являлся фрагмент монолитной железобетонной плиты перекрытия, расположенный в осях 4–5, Б–В. Геометрические размеры фрагмента, схема опирания и армирование соответствуют проектной документации, принятой на стадии строительства. Перекрытие относится к категории безбалочных плит, работающих в условиях плоского напряженно-деформированного состояния с передачей нагрузки на колонны и вертикальные несущие элементы.

В процессе эксплуатации здания возникла необходимость изменения функционального назначения помещений, расположенных над исследуемым перекрытием, связанная с размещением торгового оборудования, складированием материалов и зон массового пребывания людей. Указанные изменения привели к увеличению эксплуатационных нагрузок и изменению схемы их приложения, что потребовало подтверждения фактической несущей способности перекрытия и оценки его напряженно-деформированного состояния.

На основании данных о предполагаемом размещении оборудования, поддонов для хранения продукции и возможных зонах концентрации нагрузок была разработана программа натурных испытаний, предусматривающая поэтапное статическое нагружение исследуемого фрагмента перекрытия и контроль его деформационных характеристик.

Методика исследования включала комплекс последовательных этапов, направленных на получение достоверных геометрических и расчетных характеристик железобетонного перекрытия и оценку его фактического напряженно-деформированного состояния (рисунок 1).

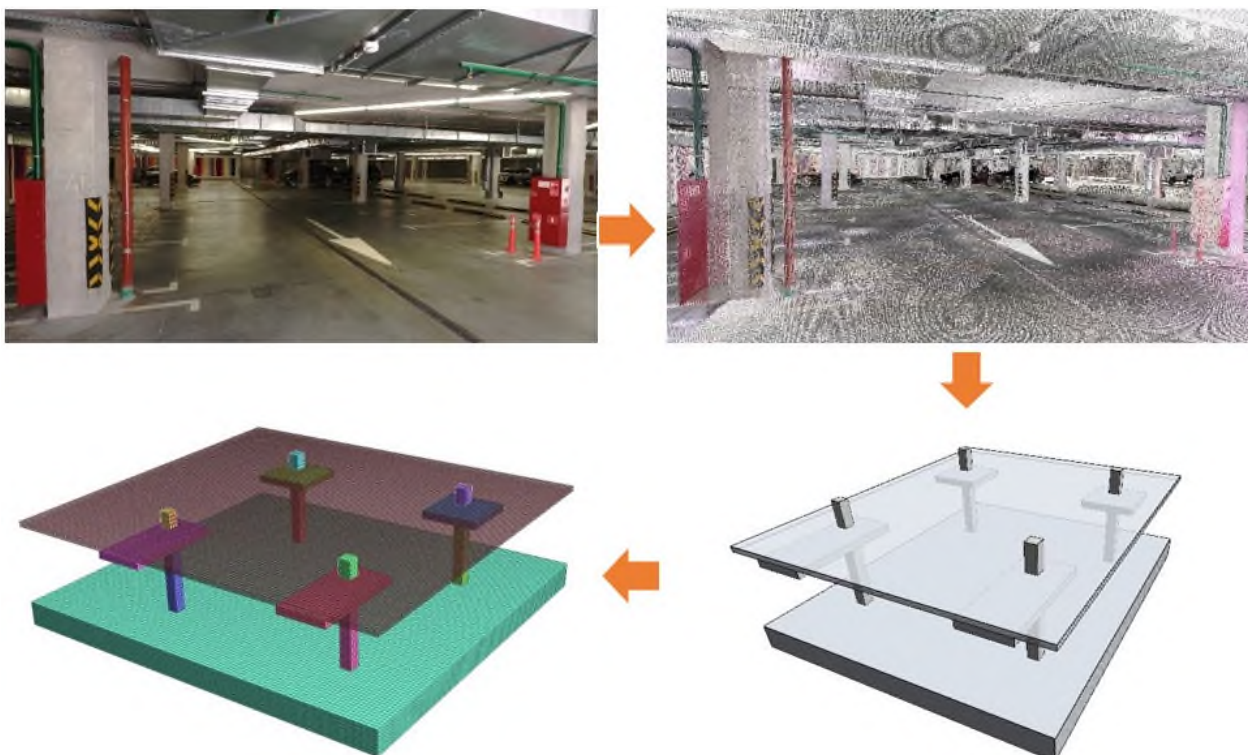


Рисунок 1. – Схема последовательности выполнения работ

На первом этапе выполнен визуальный осмотр несущих конструкций перекрытия с целью выявления дефектов, повреждений и видимых отклонений от проектного положения.

На втором этапе выполнен сбор пространственных геометрических данных объекта с применением лазерного и фотограмметрического сканирования. Сканирование конструкций осуществлялось с использованием беспилотного летательного аппарата (DJI Mavic Pro), мобильных телефонов (Samsung Galaxy S10, Apple iPhone 15 Pro Max) и наземного лазерного сканера (FARO FOCUS). В результате измерений получены облака точек, отражающие фактическое положение конструктивных элементов исследуемого фрагмента перекрытия и смежных конструкций (рисунок 2).



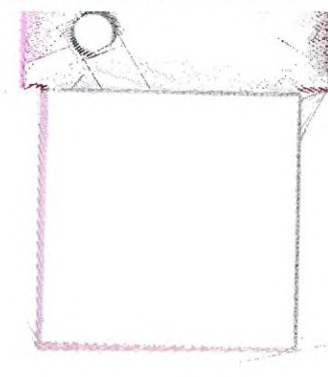
Шумы



Недостаточная плотность облака точек



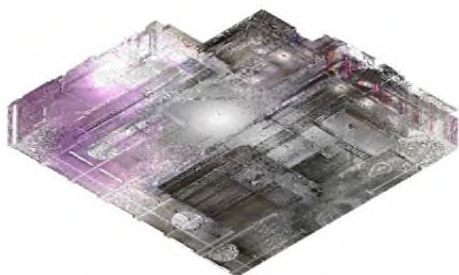
Неоднородность облака точек



Краевой эффект

Рисунок 2. – Дефекты облака точек

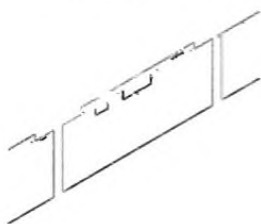
На третьем этапе выполнена обработка полученных облаков точек, включая фильтрацию шумов, удаление объектов, не относящихся к конструкциям здания, и устранение дефектов, связанных с наложением данных и неоднородностью плотности точек. Очистка и предварительная обработка выполнялись с помощью специализированного программного обеспечения. Подготовленные данные использованы для формирования цифровой информационной модели объекта (рисунок 3).



Необработанное облако точек



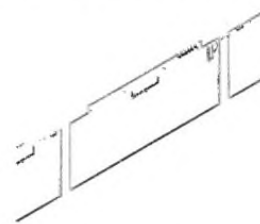
Обработанное облако точек



По оси 4



В середине пролета



По оси 5

Рисунок 3. – Обработка исходных данных плиты перекрытия над паркингом

На четвертом этапе на основе цифровой информационной модели выполнено уточнение расчетной схемы железобетонного перекрытия. При этом учитывались выявленные геометрические отклонения фактического положения несущих элементов от проектных значений, что позволило повысить адекватность расчетной модели и достоверность результатов определения напряженно-деформированного состояния.

Натурные испытания перекрытия проводились методом статического поэтапного нагружения. Нагрузка прикладывалась ступенчато с шагом 10 кН с использованием поддонов с керамической плиткой, масса которых определялась по транспортным накладным. Контроль вертикальных перемещений осуществлялся с применением прогибомеров Максимова типа ПМ, установленных в характерных точках исследуемого фрагмента перекрытия в соответствии с программой испытаний. Всего было установлено пять измерительных приборов.

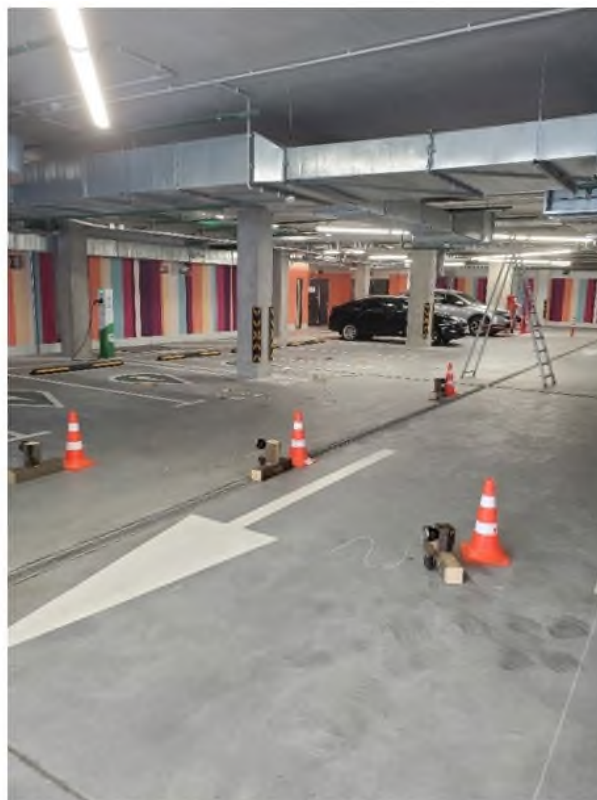
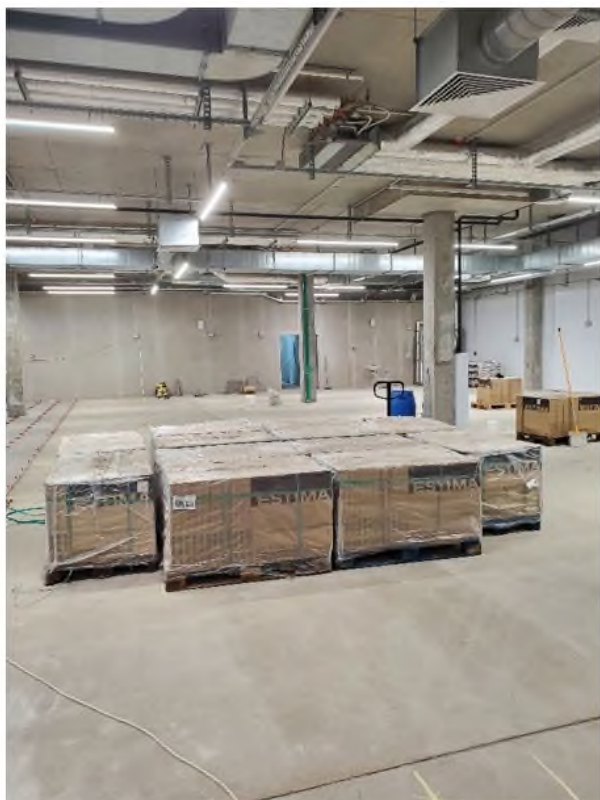


Рисунок 4. – Вид нагруженной железобетонной плиты перекрытия подземного паркинга



Рисунок 5. – Общий вид облака точек и цифровой модели объекта с использованием BIM-технологии

После каждого этапа нагружения фиксировались значения перемещений, которые заносились в рабочие таблицы и использовались для анализа напряженно-деформированного состояния конструкций. Полученные экспериментальные данные сопоставлялись с результатами расчетов, выполненных на основе уточненной расчетной схемы, что позволило произвести верификацию цифровой информационной модели.

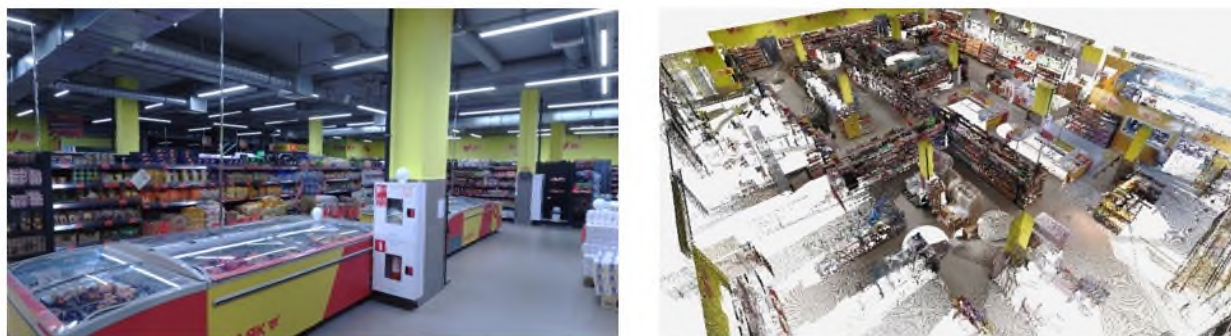


Рисунок 6. – Общий вид объекта после ввода в эксплуатацию

В ходе строительно-монтажных работ, связанных с размещением технологического оборудования, возникла необходимость корректировки проектных решений, что привело к изменению величины и схемы приложения нагрузок. С использованием цифровой информационной модели и уточненной расчетной схемы был оперативно выполнен перерасчет напряженно-деформированного состояния перекрытия и проведена оценка его эксплуатационной надежности (таблица 1).

После завершения работ выполнено контрольное сканирование объекта, что позволило оценить соответствие фактического состояния конструкций принятым расчетным решениям и использовать полученные данные для контроля эксплуатации перекрытия.

Таблица 1. – Результаты исследования технического состояния плиты перекрытия

Описание	Результаты исследования		
	техническое задание	натурные испытания	фактически смонтированное оборудование
1	2	3	4
Общий вид расчетной схемы			
Напряжения, МПа			
Перемещения, мм			

В процессе экспериментальных исследований выполнены натурные испытания фрагмента монолитной железобетонной плиты перекрытия над подземным автомобильным паркингом в соответствии с программой испытаний. Опыты проводились с поэтапным статическим нагружением, что позволило проследить изменение напряженно-деформированного состояния конструкций при последовательном увеличении нагрузки.

На основе данных лазерного и фотограмметрического сканирования сформирована цифровая информационная модель объекта, отражающая фактическое геометрическое положение несущих элементов перекрытия. Анализ полученных облаков точек позволил выявить локальные геометрические отклонения от проектного положения,

обусловленные технологическими особенностями выполнения строительно-монтажных работ. Указанные отклонения не носили системного характера, однако их учет при формировании расчетной схемы оказал влияние на распределение усилий и величины расчетных деформаций.

В ходе испытаний контроль вертикальных перемещений осуществлялся в пяти характерных точках перекрытия. Максимальная экспериментально зафиксированная величина прогиба составила 2,6 мм, что не превышает предельно допустимых значений. Полученные значения прогибов имели плавный характер изменения по мере увеличения нагрузки и не сопровождались резкими скачками, что свидетельствует об отсутствии признаков потери несущей способности или развития предельных состояний.

Расчет напряженно-деформированного состояния, выполненный на основе уточненной расчетной схемы, показал, что возникающие в железобетонной плите напряжения не превышают предельно допустимых значений при действии расчетных и эксплуатационных нагрузок. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных подтвердило адекватность принятой расчетной схемы и целесообразность использования цифровой информационной модели, сформированной на основе облаков точек, для уточнения расчетных параметров конструкций.

Особое значение в рамках исследования имела возможность оперативной корректировки расчетной схемы в связи с изменением фактических условий эксплуатации. В процессе строительно-монтажных работ была выполнена корректировка расположения технологического оборудования, что привело к изменению величины и схемы приложения нагрузок на перекрытие. Использование цифровой информационной модели позволило в кратчайшие сроки выполнить перерасчет напряженно-деформированного состояния и оценить влияние внесенных изменений на эксплуатационную надежность конструкции.

Контрольное сканирование после завершения строительно-монтажных работ и ввода объекта в эксплуатацию позволило уточнить фактическое положение элементов и сопоставить его с расчетными данными. Анализ полученных данных показал, что коэффициент использования железобетонной плиты перекрытия не превышает предельно допустимых значений, а конструкция обеспечивает восприятие эксплуатационных нагрузок без превышения ограничений по деформациям и напряжениям.

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что интеграция сканирования и BIM-технологий при проведении натурных испытаний позволяет повысить достоверность оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций. Формирование цифровой информационной модели на основе облака точек обеспечивает учет фактических геометрических параметров сооружения, что особенно важно при корректировке проектных решений.

Дополнительно установлено, что применение цифровых методов сбора и обработки данных способствует сокращению сроков принятия решений. В рассматриваемом случае использование цифровой информационной модели и уточненной расчетной схемы позволило сократить срок ввода объекта в эксплуатацию на период до двух месяцев и снизить текущие затраты.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Удостоверение оператора: гражданских БПЛА – СО №0503083 от 12 апреля 2024 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Редевелопмент промышленных территорий / А.А. Лапидус, Д.В. Топчий, В.Е. Ефремова и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2019. – Т. 17, № 4. – С. 56–61.
2. Малков И.Г., Руденкова И.В. Предпосылки, целесообразность и особенности перепрофилирования зданий // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2021. – № 16. – С. 86–93.
3. Дрозд Я.И., Пастушков Г.П. Предварительно напряженные железобетонные конструкции. – Минск: Вышэйшая школа, 1984. – 208 с.
4. Ботьяновский А.А., Пастушков В.Г. Применение BIM-технологий и новейшего оборудования при исследовании фактического технического состояния мостового сооружения // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2015. – № 1. – С. 342–345.
5. Гинзбург А.В. BIM-технологии на протяжении жизненного цикла строительного объекта // Информационные ресурсы России. – 2016. – № 5(153). – С. 28–31.
6. Деменев А.В., Артамонов А.С. Информационное моделирование при эксплуатации зданий и сооружений // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Т. 7, № 3. – С. 21–29.
7. Красковский Д. Преимущества BIM-технологии в единстве источника информации об объекте // САПР и графика. – 2015. – № 12(230). – С. 62–63.
8. Савина Е.Н., Мойсейчик Е.А., Яковлев А.А. Социальные и технические аспекты применения БПЛА и облака точек на примере транспортного сооружения при создании BIM-модели // Автомобильные дороги и мосты. – 2025. – № 1(35). – С. 48–57.
9. Экспериментальное исследование применения BIM-технологий, технологий дополненной и виртуальной реальности для транспортных сооружений / Е.Н. Савина, Е.А. Мойсейчик, А.А. Яковлев и др. // Автомобильные дороги и мосты. – 2025. – № 2(36). – С. 32–41.

10. Морина Е.А., Макаров А.И. BIM-технологии в мостовом проектировании // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 6(57). – С. 30–46.
11. Мустафин Н.Ш., Барышников А.А., Спрыжков А.М. Анализ возможности внедрения в строительство технологии информационного моделирования зданий программами вида BIM // Региональное развитие. – 2015. – № 8. – С. 9–10.
12. Зобов П.Г., Дектярев А.В., Морозов В.Н. Современные методы 3D-сканирования при размерном анализе судовых моделей с учетом их аддитивного изготовления // Известия КГТУ. – 2019. – № 53. – С. 151–161.
13. Миненко М.В. Способы восстановления 3D сцены по двумерным изображениям // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. – 2019. – Т. 1. – С. 47–50.
14. Полуэктов В.В. Российский опыт применения BIM в архитектуре и градостроительстве // Современные технологии и методики в архитектурно-художественном образовании. – 2016. – С. 179–181.
15. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures / W. Mukupa, G.W. Roberts, C.M. Hancock et al. // Survey Review. – 2017. – Vol. 49, Iss. 353. – P. 99–116. DOI: 10.1080/00396265.2015.1133039.
16. 3DCapture: 3D Reconstruction for a Smartphone / O. Muratov, D. Sidorov, A. Zaitsev et al. // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. – 2016. – P. 75–82.
17. Songa S., Yanga J., Kimb N. Development of a BIM-based structural framework optimization and simulation system for building construction // Computers in Industry. – 2012. – Vol. 63. – С. 895–912.
18. Poliarnyi N. Out-of-core surface reconstruction via global TGV minimization // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – 2021. – P. 5641–5650.

REFERENCES

1. Lapidus, A.A., Topchii, D.V., Efremova, V.E., & Kuzin, E.A. (2019). Redevelopment of industrial areas. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova [Bulletin of the Moscow State Technical University named after G. I. Nosov]*, 17(4), 56–61. (In Russ.).
2. Malkov, I.G., & Rudenkova, I.V. (2021). Prerequisites, expediency and features of redesigning buildings. *Vestnik PGU [Bulletin of Polotsk State University]*, F, (16), 86–93. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Drozd, Ya.I., & Pastushkov, G.P. (1984). *Prestressed reinforced concrete structures*. Minsk, Higher School. (In Russ.).
4. Botyanovsky, A.A., & Pastushkov, V.G. (2015). Application of BIM technologies and the latest equipment in the study of the actual technical condition of a bridge structure. *Modernizacia i nauchnye issledovania v transportnom komplekse [Modernization and scientific research in the transport complex]*, 1, 342–345. (In Russ.).
5. Ginzburg, A.V. (2016). BIM technologies throughout the life cycle of a construction project. *Informacionnye resursy Rossii [Information resources of Russia]*, 5(153), 28–31. (In Russ.).
6. Demenev, A.V., & Artamonov, A.S. (2015). Information modeling in the operation of buildings and structures. *Internet-zhurnal Naukovedenie [Internet journal "Science Studies"]*, 7(3), 21–29. (In Russ.).
7. Kraskovsky, D. (2015). Advantages of BIM technology in the unity of the source of information about the object. *SAPR i grafika [CAD and graphics]*, 12(230), 62–63. (In Russ.).
8. Savina, E.N., Moiseichik, E.A., & Yakovlev, A.A. (2025). Social and technical aspects of using UAVs and point clouds on the example of a transport facility when creating a BIM model. *Avtomobilnye dorogi i mosty [Highways and bridges]*, 1(35), 48–57 (In Russ.).
9. Savina, E.N., Moiseichik, E.A., Yakovlev, A.A., & Kulan, A.V. (2025). Experimental study of the application of BIM technologies, augmented and virtual reality technologies for transport facilities. *Avtomobilnye dorogi i mosty [Highways and bridges]*, 2(36), 32–41. (In Russ.).
10. Morina, E.A., & Makarov, A.I. (2017). BIM technologies in bridge design. *Journal Stroitel'stvo unikalnyh zdaniy i sooruzhenii [Construction of unique buildings and structures]*, 6(57), 30–46. (In Russ.).
11. Mustafin, N.Sh., Baryshnikov, A.A., & Spryzhkov, A.M. (2015). Analysis of the possibility of introducing building information modeling technology into construction using BIM programs *Regional'noe razvitiye [Regional development]*, 8, 9–10. (In Russ.).
12. Zobov, P.G., Dektyarev, A.V., & Morozov, V.N. (2019). Modern methods of 3D scanning in dimensional analysis of ship models taking into account their additive manufacturing. *Izvestiya KGTU [Bulletin of KSTU]*, 53, 151–161. (In Russ.).
13. Minenko, M.V. (2019). Methods for restoring a 3D scene from two-dimensional images. *Molodezhnaya shkola-seminar po problemam upravleniya v technicheskikh sistemach imeni A.A. Vavilova [Youth School-Seminar on Control Problems in Technical Systems named after A.A. Vavilov]*, 1, 47–50. (In Russ.).
14. Poluektov, V.V. (2016). Russian experience of using BIM in architecture and urban planning *Sovremennye tehnologii i metodiki v arhitekturno-hudozhestvennom obrazovanii [Modern technologies and methods in architectural and artistic education]*, 179–181. (In Russ.).
15. Mukupa, W., Roberts, G.W., Hancock, C.M., & Al-Manasir, K. (2017). A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. *Survey Review*, 49(353), 99–116. DOI: 10.1080/00396265.2015.1133039.
16. Muratov, O., Sidorov, D., Zaitsev, A., & Smirnov, V. (2016). 3DCapture: 3D reconstruction for a smartphone. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops* (75–82).
17. Songa, S., Yanga, J., & Kimb, N. (2012). Development of a BIM-based structural framework optimization and simulation system for building construction. *Computers in Industry*, 63, 895–912.
18. Poliarnyi, N. (2021). Out-of-core surface reconstruction via global TGV minimization. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision* (5641–5650).

THE EXPERIENCE OF USING LASER SCANNING IN CONDUCTING FIELD TESTS OF REINFORCED CONCRETE FLOOR SLABS ABOVE A PARKING LOT IN CONJUNCTION WITH BIM TECHNOLOGIES

E. SAVINA, E. MOISEITCHIK, A. YAKOVLEV, A. KULAN
(Belarusian National Technical University, Minsk)

In the context of reconstruction and changes in the functional purpose of buildings, an urgent engineering task is to reliably assess the actual bearing capacity of reinforced concrete floors. The article presents the experience of integrating laser and photogrammetric scanning with BIM technologies during field testing of a fragment of a monolithic reinforced concrete floor slab above an underground parking lot. As part of the study, full-scale tests of the overlap with phased static loading were performed. An unmanned aerial vehicle, mobile phones, and a ground-based laser scanner were used to generate geometric source data. Based on the scan results, clouds of points were obtained, on the basis of which an information model of the object was formed, taking into account the actual position of the supporting structures and the identified geometric deviations from the design values. Using an updated calculation scheme, the stress-strain state of the reinforced concrete floor was calculated and its actual bearing capacity was determined, taking into account design and operational loads. During the construction and installation work, it was necessary to adjust design solutions related to changes in the scheme and magnitude of the application of loads, which was promptly taken into account through the use of a digital information model. It is shown that the use of scanning and BIM technologies in field tests makes it possible to increase the adequacy of computational models, shorten decision-making time and ensure a reduction in the time of commissioning the facility. The results obtained confirm the prospects of using digital methods in the inspection, testing and operation of reinforced concrete structures.

Keywords: BIM technologies, digital object model, virtual reality, calculation scheme, reinforced concrete floor slab, object scanning, UAV, point cloud, stress-strain state.

УДК 624.04:69:004.94

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-42-49

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ В СОСТАВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЗДАНИЙ И ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДОПОЛНЕННОЙ И ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

**Е.Н. САВИНА, А.А. ЯКОВЛЕВ,
А.В. КУЛАН, д-р техн. наук, доц. Е.А. МОЙСЕЙЧИК
(Белорусский национальный технический университет, Минск)**

В статье рассмотрены вопросы организации мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций зданий и транспортных сооружений в составе цифрового двойника с применением технологий виртуальной и дополненной реальности. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и эксплуатационной безопасности строительных объектов, значительная часть которых эксплуатируется в условиях превышения нормативных сроков службы, роста транспортных нагрузок и воздействия неблагоприятных природно-климатических факторов. Предложен подход к построению цифрового двойника, основанный на интеграции BIM-модели, расчетных моделей, реализованных методом конечных элементов, и экспериментальных данных автоматизированного мониторинга НДС. Обоснован выбор схемы мониторинга на основе результатов численного моделирования, позволяющего идентифицировать наиболее напряженные и ответственные зоны конструкций. Показано, что включение данных мониторинга в состав цифрового двойника обеспечивает актуализацию расчетных моделей с учетом фактических условий эксплуатации и накопленных повреждений. В качестве функционального слоя цифрового двойника реализована VR/AR-среда, обеспечивающая иммерсивную визуализацию геометрии сооружений, результатов мониторинга и расчетных данных. Использование виртуальной и дополненной реальности повышает наглядность анализа распределения напряжений и деформаций, снижает влияние человеческого фактора и способствует повышению эффективности принятия инженерных решений при обследовании и эксплуатации зданий и транспортных сооружений.

Результаты выполненных исследований и апробация на реальных объектах подтверждают перспективность применения цифровых двойников с интегрированным мониторингом НДС и VR/AR-технологиями для управления техническим состоянием и эксплуатационной надежностью строительных сооружений.

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, мониторинг конструкций, цифровой двойник, BIM, метод конечных элементов, виртуальная реальность, дополненная реальность, транспортные сооружения.*

Введение. Актуальность организации мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций зданий и транспортных сооружений определяется совокупностью эксплуатационных, конструктивных и социально-экономических факторов. Значительная часть транспортной инфраструктуры, а также зданий и сооружений, эксплуатируется в условиях превышения нормативных сроков службы, увеличения интенсивности и массы транспортных нагрузок, а также воздействия природно-климатических факторов [1; 2]. Указанные условия приводят к накоплению повреждений, деградации материалов и изменению расчетных характеристик несущих элементов, что оказывает влияние на их несущую способность и существенно повышает риски достижения предельных состояний.

Традиционные методы оценки технического состояния, основанные на периодических визуальных обследованиях и локальных измерениях, не обеспечивают получения непрерывной и объективной информации о фактическом напряженно-деформированном состоянии конструкций [3; 4]. Такие подходы не позволяют в полной мере учитывать интенсивности нагрузок, развитие усталостных процессов и изменение жесткостных характеристик элементов в процессе эксплуатации. В связи с этим возникает необходимость внедрения автоматизированных систем мониторинга, обеспечивающих регистрацию параметров напряженно деформированного состояния в режиме, близком к реальному времени [5].

Основная часть. Организация мониторинга НДС конструкций в рамках настоящего исследования основывалась на принципах системности и функциональной интеграции с цифровыми двойниками зданий и транспортных сооружений [6; 7]. При формировании системы мониторинга учитывались результаты анализа применяемых современных методов, опыт их применения, а также требования к достоверности и сопоставимости экспериментальных данных с результатами численного моделирования (рисунок 1).

Обоснование выбора схемы мониторинга основывалось на положениях механики деформируемого твердого тела [8; 9], теории надежности и долговечности строительных конструкций. Ключевым этапом являлась идентификация наиболее нагруженных и имеющих значительные напряжения зон конструкций, в которых возможно достижение предельных состояний по несущей способности или эксплуатационной пригодности. Для этого использовались результаты расчетов напряженно-деформированного состояния конструкций по методу конечных элементов, позволяющие выявить зоны концентрации нормальных и касательных напряжений, определить места максимальных прогибов, а также элементы, воспринимающие переменные и циклические нагрузки. В состав системы

мониторинга включались тензометрические и деформационные датчики, а также средства регистрации динамических откликов конструкции. Автоматизированная система мониторинга НДС конструкций собирала данные с заданной периодичностью, обеспечивала их первичную обработку и передачу в информационную среду цифрового двойника. Такой подход позволил перейти от разрозненных измерений к формированию непрерывных потоков данных, отражающих фактическое поведение конструкций в реальных условиях эксплуатации. Для снижения влияния внешних факторов и случайных помех применялись процедуры фильтрации, нормализации и сопоставления экспериментальных данных с расчетными значениями. Это обеспечивало возможность выявления отклонений фактического НДС конструкций от проектных и нормативных показателей и формировало основу для уточнения расчетных моделей и оценки текущего технического состояния сооружения [10].



Борисоглебская (Коложская) церковь, памятник древнего православного зодчества XII века в Беларуси (г. Гродно)



Лабораторный корпус

а) – исследуемый объект; б) – облако точек

Рисунок 1. – Реализованные объекты

Реализация цифрового двойника зданий и транспортных сооружений осуществлялась как многоуровневая информационно-аналитическая система, предназначенная для интеграции геометрических, расчетных и экспериментальных данных, получаемых в процессе мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций. Цифровой двойник рассматривался как динамически обновляемая цифровая копия сооружения, отражающая его фактическое состояние и особенности работы в реальных эксплуатационных условиях [11; 12].

Базовым элементом цифрового двойника являлась BIM-модель транспортного сооружения, сформированная на основе проектной документации и уточненная по результатам инженерных обследований. Геометрическая актуализация BIM-модели выполнялась с использованием результатов сканирования, что обеспечило соответствие цифрового представления фактической геометрии конструктивных элементов, включая эксплуатационные отклонения и деформации (рисунок 2).

Интеграция данных мониторинга НДС конструкций в цифровой двойник осуществлялась путем пространственной и логической привязки измерительных каналов к соответствующим элементам BIM-модели. Каждому тензометрическому, деформационному или вибрационному датчику сопоставлялась конкретная зона или элемент сооружения, что позволяло интерпретировать экспериментальные данные с учетом реальной схемы работы конструкции.

Экспериментальные данные мониторинга аккумулировались в структурированной базе данных цифрового двойника и представлялись в виде цифровых значений контролируемых параметров с учетом времени их получения.



Общий вид транспортного сооружения



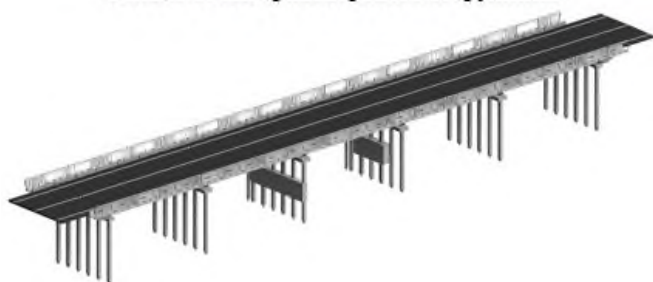
Общий вид паркинга



Облако точек транспортного сооружения



Облако точек паркинга



Цифровая модель транспортного сооружения



Цифровая модель паркинга

Рисунок 2. – Реализованные объекты

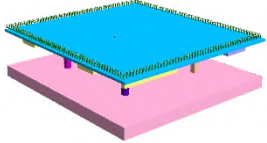
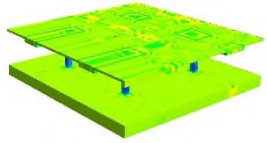
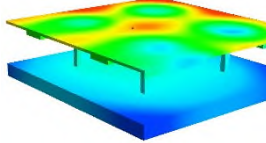
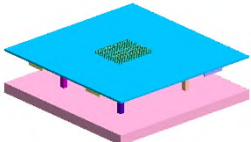
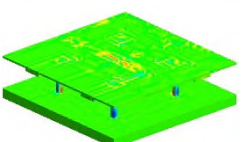
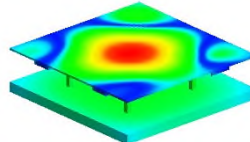
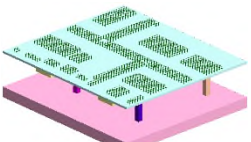
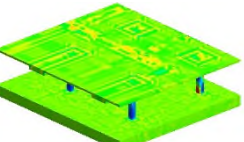
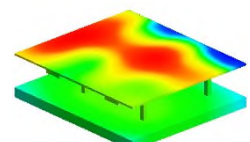
Расчетные модели сооружений, реализованные на основе метода конечных элементов, интегрировались в цифровой двойник в виде аналитического модуля. Параметры расчетных схем уточнялись на основе данных мониторинга, что позволяло учитывать фактические условия эксплуатации, изменение жесткостных характеристик элементов и влияние накопленных повреждений. Такой подход обеспечивал переход от проектных расчетных моделей к эксплуатационно-ориентированным моделям, соответствующим реальному состоянию транспортного сооружения (таблица 1).

В качестве функционального слоя цифрового двойника была реализована виртуальная и дополненная реальность (VR/AR-среда), предназначенная для иммерсивной визуализации геометрии сооружения, результатов мониторинга и расчетных данных. VR-среда обеспечивала пространственное представление BIM-модели с наложением информации о напряженно-деформированном состоянии конструкций, что позволяло выполнять интерактивный анализ распределения деформаций, перемещений и напряжений в объеме сооружения. AR-среда использовалась для совмещения цифровых моделей с реальным объектом, что обеспечивало наглядную интерпретацию результатов мониторинга непосредственно в процессе обследований и эксплуатации (рисунок 3).

Оценка эффективности применения цифрового двойника зданий и транспортных сооружений выполнялась на основе анализа его функциональных возможностей и эксплуатационных результатов, полученных при интеграции данных мониторинга напряженно деформированного состояния, численного моделирования и средств пространственной визуализации. В качестве основных критериев эффективности рассматривалась достоверность оценки НДС, оперативность обработки информации, чувствительность к изменению технического состояния и практическая применимость при строительстве и эксплуатации зданий и транспортных сооружений. Достоверность оценки напряженно-деформированного состояния конструкций обеспечивалась за счет сопоставления экспериментальных данных мониторинга с результатами численного моделирования в составе цифрового двойника. Аналогичный

подход реализован при создании цифрового двойника моста Хумбер (Великобритания), где данные тензометрического и динамического мониторинга использовались для актуализации расчетных моделей и уточнения напряженного состояния пролетных строений [16]. Результаты показали снижение расхождений между расчетными и экспериментальными значениями деформаций, что подтверждает эффективность интеграции мониторинга и расчетных моделей.

Таблица 1. – Результаты исследования технического состояния плиты перекрытия

Описание	Результаты исследования		
	Общий вид расчетной схемы	Напряжения, МПа	Перемещения, мм
техническое задание			
натурные испытания			
фактически смонтированное оборудование			

Оперативность получения и анализа информации достигалась за счет автоматизированного сбора данных и их структурированной обработки в цифровой среде. В ряде проектов, реализованных в Китае и Южной Корее на крупных мостовых сооружениях, применение цифровых двойников позволило сократить время анализа технического состояния с нескольких недель до нескольких часов за счет отказа от ручной обработки данных и перехода к круглосуточному мониторингу [17; 18]. Аналогичные эффекты наблюдаются и при использовании разработанной методологии. В реализованных проектах мониторинга вантовых и балочных мостов, описанных в работе [4], показано, что анализ получаемых значений в составе цифрового двойника позволяет выявлять ранние стадии изменения жесткости элементов, не фиксируемые традиционными методами обследования. Полученные в настоящем исследовании результаты подтверждают возможность выявления аналогичных эффектов.

Использование VR/AR-среды в составе цифрового двойника повысило эффективность интерпретации результатов мониторинга и расчетов. Примеры применения иммерсивных сред для анализа состояния мостовых сооружений представлены в работе [19], где показано, что пространственная визуализация распределения напряжений и деформаций снижает вероятность ошибок при экспертной оценке и повышает качество принятия инженерных решений. В рамках данного исследования VR/AR-среда использовалась для визуального анализа зон концентрации деформаций и сопоставления экспериментальных и расчетных данных.

Практическая эффективность применения цифрового двойника заключается в возможности обоснованного принятия решений при эксплуатации зданий и транспортных сооружений. Анализ зарубежного опыта показывает, что внедрение цифровых двойников позволяет оптимизировать объемы обследований, снизить затраты на внеплановые ремонтные работы и повысить уровень эксплуатационной безопасности [16–18]. Аналогичные выводы получены и по результатам выполненных исследований.

К основным преимуществам применения VR/AR-сред в составе цифровых двойников зданий и сооружений относятся:

1. **Повышение наглядности анализа НДС.** Пространственная визуализация распределения деформаций, напряжений и динамических характеристик позволяет интуитивно воспринимать сложные инженерные данные и выявлять зоны концентрации напряжений и аномального поведения конструкций.

2. **Интеграция разнородных данных в единой среде.** VR/AR-среда обеспечивает одновременное отображение данных мониторинга, BIM-модели, облаков точек и результатов численного моделирования, что соответствует современным концепциям цифровых двойников.

3. **Снижение влияния человеческого фактора.** Иммерсивное представление информации уменьшает вероятность ошибок при интерпретации результатов и повышает качество экспертных заключений, что подтверждено зарубежными исследованиями инспекционных систем.

4. **Поддержка дистанционного анализа и коллективной экспертизы.** Использование VR-сред позволяет выполнять виртуальные инспекции и совместный анализ состояния сооружения без физического присутствия на объекте, что особенно актуально для труднодоступных и опасных зон.

5. **Повышение эффективности принятия инженерных решений.** Визуальная привязка параметров НДС к реальным конструктивным элементам ускоряет процесс оценки технического состояния и обоснования ремонтных работ и эксплуатационных мероприятий.



Общий вид ограждающих конструкций котлована



Общий вид транспортного сооружения



Облако точек ограждающих конструкций котлована



Облако точек транспортного сооружения



Цифровая модель ограждающих конструкций котлована



Цифровая модель транспортного сооружения



Дополненная реальность (AR) ограждающих конструкций котлована



Виртуальная реальность (VR) транспортного сооружения

Рисунок 3. – Реализованные объекты

Несмотря на значительный потенциал, анализ мирового опыта выявляет ряд ограничений и недостатков применения VR/AR-сред в мониторинге зданий и сооружений:

1. **Высокие требования к качеству исходных данных.** Эффективность AR/VR-визуализации напрямую зависит от точности BIM-моделей, данных сканирования и мониторинга. Ошибки на этапе формирования цифрового двойника могут приводить к искажению визуализируемой информации.

2. **Отсутствие единых стандартов интеграции.** В настоящее время отсутствуют унифицированные стандарты интеграции VR/AR-сред с системами мониторинга НДС и BIM-платформами, что затрудняет масштабирование и промышленное внедрение решений.

3. **Ограниченная формализация аналитических функций.** В ряде реализованных проектов VR/AR-среда используется преимущественно как инструмент визуализации, без глубокой интеграции с аналитическими и прогностическими модулями цифрового двойника.

4. **Технические и организационные барьеры внедрения.** Применение VR/AR-технологий требует специализированного оборудования, программного обеспечения и подготовки персонала, что ограничивает их использование в повседневной практике эксплуатирующих организаций.

Перспективы развития VR/AR-сред в составе цифровых двойников зданий и транспортных сооружений связаны с дальнейшей эволюцией интеллектуальных систем мониторинга и управления техническим состоянием. Наиболее перспективными направлениями являются:

- глубокая интеграция VR/AR-сред с аналитическими модулями цифрового двойника, включая автоматизированную идентификацию параметров расчетных моделей и прогнозирование развития повреждений;
- разработка стандартов и методических рекомендаций по использованию VR/AR-технологий в мониторинге НДС транспортных сооружений;
- использование технологий машинного обучения для автоматического выявления аномалий и их визуализации в иммерсивной среде;
- расширение функций AR-решений для полевых обследований, включая наложение расчетных и экспериментальных данных на реальное сооружение в режиме реального времени;
- переход от демонстрационных решений к промышленным системам, интегрированным в процессы эксплуатации и управления жизненным циклом зданий и транспортных сооружений.

Заключение. Результаты исследования подтверждают, что применение цифрового двойника зданий и транспортных сооружений обеспечивает повышение информативности и надежности контроля НДС конструкций. Использование данного подхода создает предпосылки для перехода к интеллектуальным системам управления техническим состоянием строительных объектов.

Реализованные цифровые двойники, включающие BIM-модель, данные мониторинга, VR/AR-среду, расчетные схемы и вспомогательные модули, обеспечили целостное представление о состоянии сооружения, анализ изменения напряженно-деформированного состояния конструкций, формирование информационной основы для управления эксплуатационной надежностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пастушков В.Г., Ботьяновский А.А., Костюкович О.В. Применение передовых технологий при оценке технического состояния автодорожного путепровода в г. Бресте // Автомобильные дороги и мосты. – 2021. – № 1(27). – С. 13–19.
2. Практика применения автоматизированной системы мониторинга строительных конструкций транспортных сооружений / В.Г. Пастушков, А.Н. Вайтович, О.В. Костюкович и др. // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2021. – № 4. – С. 77–90.
3. Костюкович О.В., Пастушков В.Г. Исследование НДС пролетных строений индивидуального проектирования и производства // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2021. – № 1. – С. 40–47.
4. Васильев А.И. Мониторинг технического состояния мостовых сооружений: учебное пособие. – М.: МАДИ, 2021. – 120 с.
5. Дрозд Я.И., Пастушков Г.П. Предварительно напряженные железобетонные конструкции. – Минск: Вышэйшая школа, 1984. – 208 с.
6. Medrano-Sánchez E., Martos E. Strategies for bridge maintenance using BIM: An analysis of methodologies and tools [Electronic resource] // *Frontiers in Built Environment*. – 2025. – Vol. 11. – URL: <https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2025.1693644/full> (дата обращения 11.01.2026).
7. Application of Building Information Modeling (BIM) in Bridge Design and Construction Management / M.R. Ferdous, M. Biswas, M.R. Jany et al. // *American Journal of Innovation in Science and Engineering*. – 2025. – Vol. 4, № 3. – P. 30–37.
8. Mohamed A.G., Khaled A., Abotaleb I.S. A Bridge Information Modeling (BrIM) framework for inspection and maintenance intervention in reinforced concrete bridges [Electronic resource] // *Buildings*. – 2023. – Vol. 13, Iss. 11. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/11/2798> (дата обращения 11.01.2026).
9. Integration of TLS-derived Bridge Information Modeling (BrIM) with a Decision Support System (DSS) for digital twinning and asset management of bridge infrastructures [Electronic resource] / M. Mohammadi, M. Rashidi, Y. Yu et al. // *Computers in Industry*. – 2023. – Vol. 147. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361523000313> (дата обращения 11.01.2026).
10. A Concise Review of State-of-the-Art Sensing Technologies for Bridge Structural Health Monitoring [Electronic resource] / X. Kang, B. Zhu, Y. Cai et al. // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25, Iss. 17. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/17/5460> (дата обращения 11.01.2026).
11. Савина Е.Н., Мойсейчик Е.А., Яковлев А.А. Социальные и технические аспекты применения БПЛА и облака точек на примере транспортного сооружения при создании BIM-модели // Автомобильные дороги и мосты. – 2025. – № 1(35). – С. 48–57.
12. Экспериментальное исследование применения BIM-технологий, технологий дополненной и виртуальной реальности для транспортных сооружений / Е.Н. Савина, Е.А. Мойсейчик, А.А. Яковлев и др. // Автомобильные дороги и мосты. – 2025. – № 2(36). – С. 32–41.

13. Ботьяновский А.А., Пастушков В.Г. Применение BIM-технологий и новейшего оборудования при исследовании фактического технического состояния мостового сооружения // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2015. – № 1. – С. 342–345.
14. Гинзбург А.В. BIM-технологии на протяжении жизненного цикла строительного объекта // Информационные ресурсы России. – 2016. – № 5(153). – С. 28–31.
15. Деменев А.В., Артамонов А.С. Информационное моделирование при эксплуатации зданий и сооружений // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Т. 7, № 3. – С. 21–29.
16. Digital twin-based framework for bridge structural health monitoring [Electronic resource] / C. Ye, J. Wang, H. Sun et al. // Proceedings of the International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. – 2019. – URL: <https://www.dpi-proceedings.com/index.php/shm2019/article/view/32287> (дата обращения 11.01.2026).
17. Digital twin-based structural health monitoring and measurements of dynamic characteristics in balanced cantilever bridge [Electronic resource] / T. Jirawattanasomkul, L. Hang, S. Srivaranun et al. // Resilient Cities and Structures. – 2025. – Vol. 4, № 3. – P. 48–66. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772741625000365> (дата обращения 11.01.2026).
18. Mehta K.P. Digital twins for bridge health monitoring: A review [Electronic resource] // International Journal of Research in Artificial Intelligence. – 2023. – URL: <https://ijrai.org/index.php/ijrai/article/view/39> (дата обращения: 11.01.2026).
19. Evolution of digital twin frameworks in bridge management: Review and future directions [Electronic resource] / V. Mousavi, M. Rashidi, M. Mohammadi et al. // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, № 11. – URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/11/1887> (дата обращения: 11.01.2026).

REFERENCES

1. Pastushkov, V.G., Botyanovsky, A.A., & Kostyukovich, O.V. (2021). Application of advanced technologies in assessing the technical condition of a road overpass in the city of Brest. *Avtomobilnye dorogi i mosty*, 1(27), 13–19. (In Russ.).
2. Pastushkov, V.G., Vaitovich, A.N., Kostyukovich, O.V., & Yankovsky, L.V. (2021). Practice of applying an automated monitoring system for structural components of transport facilities. *Transport. Transport Facilities. Ecology*, (4), 77–90. (In Russ.).
3. Kostyukovich, O.V., & Pastushkov, V.G. (2021). Study of the stress–strain state of span structures of individual design and production. *Transport. Transport Facilities. Ecology*, (1), 40–47. (In Russ.).
4. Vasilyev, A.I. (2021). *Monitoring of the technical condition of bridge structures (Study guide)*. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI). (In Russ.).
5. Drozd, Ya.I., & Pastushkov, G.P. (1984). *Prestressed reinforced concrete structures*. Minsk, Higher School. (In Russ.).
6. Medrano-Sánchez, E., & Martos, E. (2025). Strategies for bridge maintenance using BIM: An analysis of methodologies and tools. *Frontiers in Built Environment*, 11. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/built-environment/articles/10.3389/fbuil.2025.1693644/full>.
7. Ferdous, M.R., Biswas, M., Jany, M.R., & Rakhsit, S. (2025). Application of Building Information Modeling (BIM) in bridge design and construction management. *American Journal of Innovation in Science and Engineering*, 4(3), 30–37.
8. Mohamed, A.G., Khaled, A., & Abotaleb, I.S. (2023). A Bridge Information Modeling (BrIM) framework for inspection and maintenance intervention in reinforced concrete bridges. *Buildings*, 13(11). URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/11/2798>.
9. Mohammadi, M., Rashidi, M., Yu, Y., & Samali, B. (2023). Integration of TLS-derived Bridge Information Modeling (BrIM) with a decision support system for digital twinning and asset management of bridge infrastructures. *Computers in Industry*, 147. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361523000313>.
10. Kang, X., Zhu, B., Cai, Y., Xiao, Y., Liu, N., Guo, Z., Wang, Q.-A., & Luo, Y. (2025). A concise review of state-of-the-art sensing technologies for bridge structural health monitoring. *Sensors*, 25(17). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/17/5460>.
11. Savina, E.N., Moiseichik, E.A., & Yakovlev, A.A. (2025). Social and technical aspects of using UAVs and point clouds on the example of a transport facility when creating a BIM model. *Avtomobilnye dorogi i mosty [Highways and bridges]*, 1(35), 48–57 (In Russ.).
12. Savina, E.N., Moiseichik, E.A., Yakovlev, A.A., & Kulan, A.V. (2025). Experimental study of the application of BIM technologies, augmented and virtual reality technologies for transport facilitiesю *Avtomobilnye dorogi i mosty [Highways and bridges]*, 2(36), 32–41. (In Russ.).
13. Botyanovsky, A.A., & Pastushkov, V.G. (2015). Application of BIM technologies and the latest equipment in the study of the actual technical condition of a bridge structure. *Modernizacia i nauchnye issledovania v transportnom komplekse [Modernization and scientific research in the transport complex]*, 1, 342–345. (In Russ.).
14. Ginzburg, A.V. (2016). BIM technologies throughout the life cycle of a construction project. *Informacionnye resursy Rossii [Information resources of Russia]*, 5(153), 28–31. (In Russ.).
15. Demenev, A.V., & Artamonov, A.S. (2015). Information modeling in the operation of buildings and structures. *Internet-zhurnal Naukovedenie [Internet journal "Science Studies"]*, 7(3), 21–29. (In Russ.).
16. Ye, C., Wang, J., Sun, H., & Li, Z. (2019). Digital twin-based framework for bridge structural health monitoring. In *Proceedings of the International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*. URL: <https://www.dpi-proceedings.com/index.php/shm2019/article/view/32287>.
17. Jirawattanasomkul, T., Hang, L., Srivaranun, S., Likitlersuang, S., Jongvivatsakul, P., Yodsudjai, W., & Thammarak, P. (2025). Digital twin-based structural health monitoring and measurements of dynamic characteristics in balanced cantilever bridge. *Resilient Cities and Structures*, 4(3), 48–66. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772741625000365>.
18. Mehta, K.P. (2023). Digital twins for bridge health monitoring: A review. *International Journal of Research in Artificial Intelligence*. URL: <https://ijrai.org/index.php/ijrai/article/view/39>.
19. Mousavi, V., Rashidi, M., Mohammadi, M., & Samali, B. (2024). Evolution of digital twin frameworks in bridge management: Review and future directions. *Remote Sensing*, 16(11). URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/11/1887>.

Поступила 24.02.2026

**SYSTEMS FOR MONITORING THE STRESS-STRAIN STATE OF STRUCTURES
AS PART OF A DIGITAL TWIN OF BUILDINGS AND TRANSPORT STRUCTURES
USING AUGMENTED AND VIRTUAL REALITY**

E. SAVINA, A. YAKOVLEV, A. KULAN, E. MOISEITCHIK
(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article discusses the issues of organizing monitoring of the stress-strain state of building structures and transport structures as part of a digital twin using virtual and augmented reality technologies. The relevance of the study is due to the need to improve the reliability and operational safety of construction facilities, a significant part of which are operated in conditions of exceeding standard service life, increased transport loads and the impact of adverse natural and climatic factors. An approach to building a digital twin is proposed based on the integration of a BIM model, computational models implemented by the finite element method, and experimental data from automated stress-strain state monitoring. The choice of a monitoring scheme based on the results of numerical modeling is justified, which makes it possible to identify the most stressed and critical areas of structures. It is shown that the inclusion of monitoring data in the digital twin ensures that the calculated models are updated taking into account the actual operating conditions and accumulated damage. A VR/AR environment has been implemented as a functional layer of the digital twin, providing immersive visualization of the geometry of the structure, monitoring results and calculated data. The use of virtual and augmented reality increases the visibility of stress and strain distribution analysis, reduces the influence of the human factor, and improves the efficiency of engineering decision-making during the inspection and operation of buildings and transport facilities.

The results of the performed research and testing on real objects confirm the prospects of using digital twins with integrated VAT monitoring and VR/AR technologies to manage the technical condition and operational reliability of construction structures.

Keywords: *stress-strain state, monitoring of structures, digital twin, BIM, finite element method, virtual reality, augmented reality, transport facilities.*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДА КЕЛЬВИНА ДЛЯ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ КОРРОЗИИ ТРУБОПРОВОДНОЙ СТАЛИ

А.Л. СВИСТУН,

канд. техн. наук, доц. К.В. ПАНТЕЛЕЕВ,

д-р техн. наук, проф. В.Н. РОМАНЮК

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Раскрытие механизмов коррозии и повышение стойкости материалов требуют перехода от оценки интегральных характеристик к анализу процессов на микроуровне. Целью данной работы является установление корреляции между пространственным распределением работы выхода электрона (РВЭ) поверхности стали и локализацией очагов коррозионного разрушения с использованием метода сканирующего зонда Кельвина (СЗК). Эксперименты на образце трубопроводной стали в растворе NaCl продемонстрировали, что СЗК способен детектировать зарождение питтинговой коррозии путем картирования распределения РВЭ. В результате установлена корреляция между локальными вариациями РВЭ и иницированием коррозии, что позволяет диагностировать разрушение на докритической стадии, задолго до появления видимых дефектов. Таким образом, работа подтверждает, что метод СЗК служит высокоинформативным инструментом для микроуровневого анализа механизмов коррозии. Прямым развитием данного исследования является применение метода СЗК для изучения кинетики коррозии стали газопроводов в модельных и натуральных почвенных электролитах с целью разработки прогнозных моделей и карт коррозионной опасности.

Ключевые слова: сканирующий зонд Кельвина (СЗК), подземные газопроводы, коррозия стали, потенциал Вольта, работа выхода электрона (РВЭ), питтинговая коррозия, распределение поверхностного потенциала, сталь Ст3, контактная разность потенциалов (КРП).

Введение. Проблема сохранения существующей системы распределительных газопроводов актуальна для Беларуси в связи с большим объемом существующей сети тем, что значительная часть газопроводов имеет срок эксплуатации более 50 лет. В этом контексте стоит задача продолжения эксплуатации последних или их замены. Замена газопроводов весьма дорогостоящая, что обуславливает необходимость решения задачи оценки надежности существующей сети с тем, чтобы продлить сроки эксплуатации. В работе [1] рассматриваются почвенные факторы, влияющие на состояние подземных распределительных газопроводов в части коррозионного разрушения. Там же показано, что одной из задач является определение состояния газопроводов, зависящего от ряда факторов, среди которых наиболее важным является влияние грунтов. Решения указанной задачи, как правило, обобщенные, что ставит актуальной задачу конкретизации характеристик взаимодействия пары металл-грунт.

Современные исследователи, помимо оценки стандартных интегральных характеристик материала (таких как скорость коррозии, прочность, глубина межкристаллитной коррозии и др.), подробно изучают причины коррозионного разрушения на макро- и микроуровнях, чтобы раскрыть механизмы коррозии и оптимизировать коррозионную стойкость материалов. В этих исследованиях широко применяются методы оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, электрохимические методы. В части изучения коррозии широкое распространение в последнее время находит метод сканирующего зонда Кельвина (СЗК). Данный метод обеспечивает определение пространственного распределения работы выхода электрона (РВЭ) с поверхности материала. РВЭ представляет собой фундаментальную характеристику твердого тела, зависящую от множества факторов, включая коррозионные процессы [2; 3]. Даже атомарные изменения состояния поверхности, такие как начальные стадии адсорбции или окисления, влияют на положение уровня Ферми, что непосредственно отражается на величине РВЭ [2]. Благодаря этой зависимости метод СЗК обладает способностью детектировать ультрамалые изменения поверхностных свойств, инициированные коррозией, до проявления макроскопических или визуально наблюдаемых признаков [4; 5]. Эта особенность делает метод СЗК высокоэффективным инструментом для детектирования и пространственной локализации зарождающихся очагов коррозии.

Основная часть. В основе метода СЗК лежит принцип вибрирующего конденсатора (зонда Кельвина) [2]. Эталонная поверхность чувствительного элемента (зонд), выполненного из материала с относительно стабильными свойствами (золото, никель), и исследуемая поверхность образуют обкладки плоского конденсатора, разделенные воздушным зазором. Между обкладками конденсатора возникает контактная разность потенциалов (КРП, электричество Вольта). Измеряемая КРП (U_{CPD}) прямо пропорциональна разности РВЭ (ϕ) поверхности материалов зонда и образца [2]:

$$U_{CPD} = \frac{\phi_1 - \phi_2}{e},$$

где e – заряд электрона.

В методе СЗК чувствительный элемент (зонд) совершает колебательные движения с заданной частотой перпендикулярно поверхности образца. Это приводит к периодическому изменению расстояния между зондом и поверхностью, которое модулирует ёмкость образованного ими конденсатора. При наличии КРП между материалами зонда и образца, модуляция ёмкости индуцирует в измерительной цепи переменный ток, амплитуда и фаза которого пропорциональны величине КРП.

Для точного измерения КРП применяется компенсационная (нулевая) схема. Электронная система обратной связи подаёт на зонд внешнее постоянное смещающее напряжение (компенсирующее напряжение, U_{bias}). Это напряжение автоматически регулируется до полного подавления переменной составляющей тока в цепи. В состоянии компенсации приложенное напряжение равно по величине и противоположно по знаку искомой КРП ($U_{\text{bias}} = -U_{\text{CPD}}$).

Последовательное сканирование зондом поверхности с регистрацией U_{bias} в каждой точке позволяет построить двумерную карту распределения КРП. Метод СЗК является бесконтактным и неинвазивным. Его важным практическим преимуществом в сравнении с большинством методов анализа поверхности является возможность проведения измерений в атмосферных условиях, без необходимости создания вакуума, что критически важно для исследований технических поверхностей, например, сегментов основного металла реальных трубопроводов.

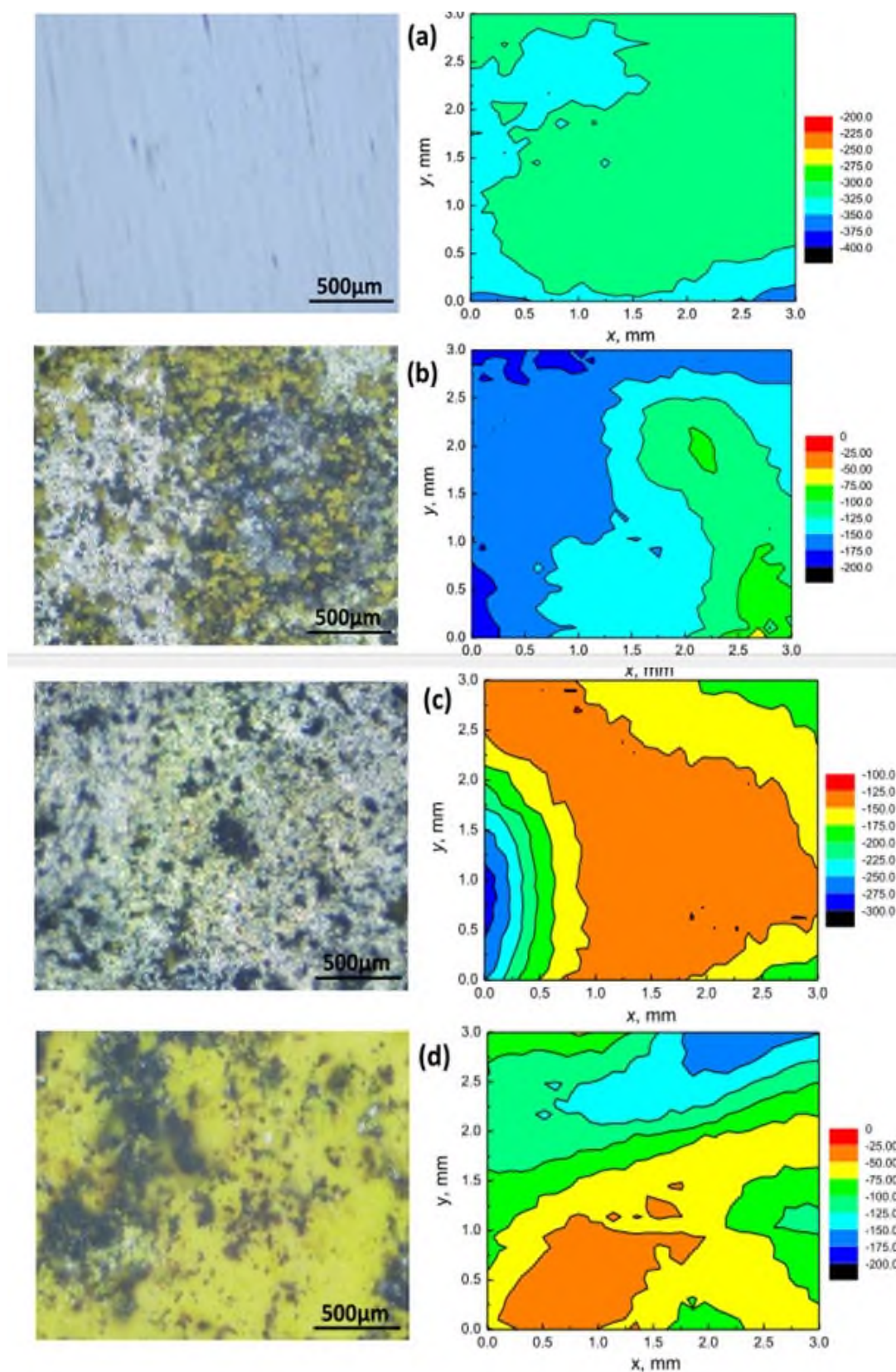
Метод СЗК в сканирующей модификации является одним из наиболее перспективных для исследования коррозионных процессов. Окисные пленки на металле вызывают соответствующие изменения физико-химического и механического состояния его поверхности. Такие изменения ведут к смещению электрохимического потенциала (уровень Ферми) внутри металла и образованию двойного электрического слоя на границе раздела металл-покрытие, что определяет значение РВЭ поверхности. Локальные изменения РВЭ прямо пропорциональны эффективному дипольному моменту и степени межмолекулярного взаимодействия материалов основания с покрытием. Нарушение межмолекулярных связей ведет к соответствующим изменениям РВЭ и, соответственно, неоднородности потенциального рельефа субстрата с покрытием, при этом в случае такого дефекта, как непрочный метод Кельвина регистрируется локальное изменение РВЭ относительно бездефектного участка [4].

В работе [6] методом СЗК изучается электрохимическое поведение и локальный механизм щелевой коррозии углеродистой стали 20 с отслоившимся покрытием, с акцентом на влияние размера дефектов (ширина 200 мкм и 800 мкм) после 10 дней погружения в имитирующий почвенный раствор. В результате максимальный потенциал дефекта 200 мкм (0,2500 В) был выше, чем у дефекта 800 мкм (0,0125 В). То есть с увеличением ширины дефекта общий потенциал смешался в отрицательную сторону. Визуализация области с аномальным потенциалом в месте дефекта с помощью метода СЗК позволяет отследить распространение подпленочной коррозии, поэтому данный метод может рассматриваться как эффективный метод диагностики целостности защитных покрытий.

СЗК используется для изучения влияния ионного состава грунта. Взаимосвязь между концентрацией растворенного кислорода (РК) (в диапазоне от 0,85 до 20,20 ppm) и электрохимической коррозией стали Х80 в моделирующем растворе кислой почвы методом СЗК исследуется в статье [7]. В результате измерений получено распределение потенциала по данным СЗК для стали Х80 в различном состоянии. Выяснилось, что поверхностный потенциал некорродированной стали Х80 был отрицательным, но его распределение было равномерным. Поверхность стали Х80 была покрыта продуктом коррозии после 48-часового воздействия в модельном растворе, независимо от уровня РК. Притом поверхностный потенциал сместился в положительную сторону, разность потенциалов увеличилась, и на карте СЗК появились явные катодные и анодные области. Кроме того, морфология поверхности корродированной стали Х80 и распределение потенциала СЗК показали хорошее соответствие, как видно на рисунке 1 (цитируется по [7]).

При РК 20,20 ppm поверхностный потенциал стали Х80 был более положительным, распределение было равномерным, а разница потенциалов составляла всего 98 мВ, что указывает на то, что на поверхности стали Х80 почти сформировался однородный слой продуктов коррозии. При РК 4,12 ppm поверхностный потенциал стали Х80 был более отрицательным и значительно колебался, максимальная разница потенциалов достигала 189 мВ, а активные области имели полосчатое распределение, что указывало на то, что на поверхности электрода мог образоваться слой рыхлого, пористого продукта коррозии, не изменяя активного состояния растворения стали.

В статье [8] с использованием метода СЗК изучается влияние диффузии ионов железа на коррозионное поведение углеродистой стали в трех различных средах, имитирующих почву: модельный раствор, каолин и агар-агель. Изменения потенциала на границе раздела «сталь-среда» четко отражают начало коррозии и состояние диффузии ионов металлов, а также рост диффузионной зоны и слоя ржавчины со временем. Диффузия ионов и продуктов коррозии в каолине была неравномерной и различалась в разных локальных областях. В почвенной среде, из-за сложности структуры почвы и различий в физико-химических свойствах, ионы металла и связанные с ними продукты коррозии также преимущественно диффундируют по пустотам с высокой пористостью или влажностью после растворения металла. Таким образом, метод СЗК способен визуализировать изменение распределения потенциала в зависимости от состава среды, а также отслеживать градиенты потенциала, вызванные диффузией ионов железа в модельный грунт.



- (a) – сталь X80, не подвергавшаяся коррозии;
 (b) – сталь X80, выдержанная в растворе с содержанием 0,85 ppm РК;
 (c) – сталь X80, выдержанная в растворе с содержанием 4,12 ppm РК;
 (d) – сталь X80, выдержанная в растворе с содержанием 20,20 ppm РК

Рисунок 1. – Оптическое изображение (слева) и распределение потенциала, полученное методом сканирующего зонда Кельвина (СКЗ) (справа), для стали X80 [7]

Изучение влияния микроструктуры металла на развитие коррозии также возможно с использованием СЗК. Коррозионное поведение сварного соединения из сплава Al-Cu-RE (алюминий-медь-редкоземельные элементы RE=La, Ce) в щелочном почвенном экстракте исследуется в статье [9]. Изучены особенности коррозии в различных зонах сварного соединения: в зоне сварного шва (WZ), зоне термического влияния (HAZ) и основном металле (BM). СЗК использовался для измерения поверхностного потенциала. Поверхностный потенциал зоны сварного шва был значительно ниже, чем у основного металла и зоны термического влияния. Это создает микрогальваническую коррозионную пару, где зона сварного шва действует как анод и растворяется, зона термического влияния выступает как катод.

В статье [10] исследуется корреляция между микрогальванической коррозией и скоростью коррозии на начальной стадии коррозии двухфазной стали, полученной методом непрерывного отжига, в растворе NaCl. С применением метода СЗК выявлено, что оба типа мартенсита действуют как микрокатод и способствуют анодному растворению прилегающей ферритной матрицы.

Для выявления причины преждевременного выхода из строя трубы из низкоуглеродистой стали [11] в системе централизованного теплоснабжения после 6 лет эксплуатации произведен визуальный осмотр и лабораторные исследования с помощью оптической микроскопии. Отказ произошел из-за питтинговой коррозии как снаружи, так и внутри трубы, но более выраженной снаружи. Обнаружены включения алюминия (Al) (0,04% Al в составе) и локальная неоднородность в виде увеличенной объемной доли перлита в области питтинговой коррозии (13,68% перлита против 5,57% в зоне равномерной коррозии). Включения Al и разница в коэффициентах теплового расширения Fe/Al привели к образованию микрощелей вокруг включений, инициируя щелевую коррозию. Таким образом, применение метода СЗК при изучении влияния микроструктуры металла на коррозию позволило получить ряд значимых результатов, а именно: зарегистрировать разницу потенциалов между металлом сварного шва и основным металлом, доказывая наличие гальванических пар, установить разницу потенциалов между мартенситом (катод) и ферритом (анод) в двухфазной стали, а также выявить локальные минимумы потенциала вокруг включений Al, указывающих на анодную активность как предпосылку зарождение питтинга.

В последнее время внимание исследователей привлекает микробиологически индуцированная коррозия (МИК). В исследовании [12] изучалось влияние нитратредуцирующей бактерии (*Bacillus cereus*) на коррозионное растрескивание под напряжением стали X80. Исследователи акцентировали внимание на том, как различные микроструктуры стали влияют на начальную адгезию бактерий и последующую коррозию. Метод СЗК был использован для изучения связи между термодинамической стабильностью поверхности различных микроструктур стали и их склонностью к начальной адгезии бактерий. Крупнозернистая сталь показала более высокий потенциал Вольта (более высокую РВЭ) по сравнению с другими микроструктурами стали по результатам опытов. Высокий потенциал Вольта указывает на более значительную термодинамическую нестабильность поверхности образца. Это связано с крупным размером зерна, увеличением границ зерен и неравномерным расположением атомов, то есть с микроструктурой образца, которая приводит к формированию большого числа активных центров растворения и электронов. Эти активные центры растворения и электроны на поверхности облегчают прикрепление бактерий и получение ими электронов. Результаты с использованием метода СЗК согласуются с данными по начальной адгезии, которые показали, что крупнозернистая сталь имела наибольшее количество прикрепившихся клеток *Bacillus cereus* на ранних этапах погружения. Метод СЗК стал действенным инструментом для выявления повышенной восприимчивости крупнозернистой стали к адгезии *Bacillus cereus*, что затем привело к самой высокой скорости коррозии.

Методы сканирования зондом Кельвина и сканирующей Кельвин-зондовой силовой микроскопии (SKPFM) активно используются также для изучения проникновения водорода в металлы. Метод СЗК позволяет локально обнаруживать проникновение водорода в сталь [13]. Считается, что присутствие атомов водорода (H) на поверхности образца влияет на потенциал Вольта. Исследование, проведенное в [14] показало, что наличие атомов H в стали связано с повышенным потенциалом Вольта. Измерение потенциала Вольта с помощью SKPFM, таким образом, предоставляет возможный метод для обнаружения атомов H в сталях. Согласно спецификациям оборудования, более положительный (или менее отрицательный) потенциал Вольта указывает на более высокую концентрацию атомов H. В исследовании [13] указывается, что менее благородный потенциал пленки палладия (Pd), нанесенной на сторону обнаружения водорода, свидетельствует о том, что пленка Pd поглощает водород (связывание Pd/H).

Для выяснения связи между процессом коррозии и проницаемостью водорода Сугаэ и др. [13] разработали оборудование Double-Head Scanning Kelvin Probe (DHSKP) – сканирующий зонд Кельвина с двойной головкой. Каждым зондом можно одновременно измерять потенциал коррозии на корродирующей стороне (сторона, подверженная коррозионному раствору) и поверхностный потенциал на стороне обнаружения водорода. Это позволяет одновременно отслеживать, как коррозионный процесс влияет на проницаемость водорода в сталь, что не было полностью изучено ранее.

На основании анализа научной литературы можно сделать вывод, что метод сканирующего зонда Кельвина (СЗК) является перспективным инструментом для изучения коррозии стали, в том числе и при изучении коррозии подземных трубопроводов.

Приборы и материалы экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования выполнены на специализированной установке бесконтактной сканирующей электрометрии «СКАН-19», разработанной и изготовленной в Белорусском национальном техническом университете по заказу ОАО «ИНТЕГРАЛ». Первоначальным назначением установки являлась диагностика параметров однородности полупроводниковых пластин (фото-ЭДС, диффузионная длина, удельное поверхностное сопротивление). Однако универсальность физического принципа метода вибрирующего зонда Кельвина позволяет применять данную установку для исследований и анализа поверхности металлов, сплавов и диэлектриков [15]. Основные технические характеристики, гарантирующие высокую точность и пространственное разрешение, приведены в таблице 1. Установка обеспечивает прямое картирование распределения РВЭ (коррелирующей с поверхностным электрохимическим потенциалом) с погрешностью не более 2,0 мЭВ в диапазоне от ± 2 до ± 2500 мЭВ. Пространственное разрешение сканирования составляет 0,5 мм, что достаточно для идентификации локальных очагов коррозии, таких как зарождающиеся питтинги.

Таблица 1. – Технические характеристики СКАН-19

Параметр	Показатель
Датчик определения электростатического потенциала	Цифровой зонд Кельвина
Диаметр чувствительного элемента зонда, мм	1
Диапазон измерений поверхностного потенциала, В	± 2
Погрешность определения потенциала поверхности, мВ	± 2
Система позиционирования	3-х координатная на базе шаговых двигателей
Точность позиционирования, мкм	± 5
Пространственная разрешающая способность, мкм	10
Область сканирования, мм	200×200

Ключевым измерительным модулем установки является уникальный цифровой измеритель КРП, также разработанный в БНТУ [16]. Применение цифровой обработки сигнала и косвенной компенсационной схемы измерения позволило достичь скорости единичного измерения до 50 раз выше по сравнению с традиционными аналоговыми измерителями КРП, использующими метод вибрирующего зонда.

Данное техническое преимущество делает установку применимой для сканирования относительно больших площадей поверхности. В стандартном режиме сканирования она обеспечивает картирование распределения потенциала на образце диаметром до 200 мм. Полное сканирование такой площади выполняется приблизительно за 2 часа, при этом время может варьироваться в зависимости от выбранного пространственного разрешения и режима усреднения сигнала.

Для перспективных исследований важной конструктивной особенностью СКАН-19 является наличие модуля программируемого оптического освещения исследуемой поверхности. Данный модуль позволяет создавать контролируемую фотостимуляцию в процессе сканирования, что открывает перспективные направления для углубленного изучения механизмов коррозии. Например, целенаправленная фотостимуляция локальных участков поверхности позволяет изучать фотоиндуцированные изменения электрохимического потенциала. Для исследования стали особенно актуальным является анализ окисных, пассивирующих или адсорбированных поверхностных слоёв, электрохимические свойства которых проявляют чувствительность к внешнему оптическому облучению. Измерение динамики КРП при фотостимуляции даёт информацию о скорости и характере фотоэлектронных переходов, влияющих на коррозионную стойкость.

Объектом исследования служила пластина из низкоуглеродистой конструкционной стали марки Ст3. Данная марка широко применяется при изготовлении элементов подземных распределительных газопроводов. Для обеспечения воспроизводимости результатов и устранения влияния загрязнений, поверхность образца была последовательно обработана путем механической зашлифовки абразивной бумагой с зернистостью Р1800 до визуального однородного состояния. Затем образцы были обезжирены и промыты дистиллированной водой. После подготовки образец выдерживали на воздухе в течение 1 часа для нормализации состояния поверхности и стабилизации естественной оксидной плёнки. В качестве вмещающей среды использовался 5% раствор хлорида натрия (NaCl). Образец погружался в раствор только наполовину. Данная конфигурация формирует на одном образце четко выраженную границу металл-электролит-воздух, в зоне которой локализуется наиболее интенсивный коррозионный процесс, обусловленный дифференциальной аэрацией. Исследования проводились при комнатной температуре (22 ± 2 °C).

Результаты исследований и их обсуждение. На рисунке 2 представлены результаты анализа поверхности образца в исходном (невозмущенном) состоянии. Визуальный осмотр (см. рисунок 2, а) подтверждает отсутствие видимых дефектов, загрязнений и активных коррозионных очагов. Поверхность однородна и характеризуется наличием естественной оксидной плёнки, сформировавшейся в атмосферных условиях. Карта потенциала (см. рисунок 2, б) демонстрирует относительно равномерное распределение КРП (отражает распределение относительных значений РВЭ) по всей площади образца. Наблюдаемый градиент цвета, соответствующий диапазону значений от 45 до 90 мВ, является плавным и не имеет резких локальных аномалий. Такая картина соответствует термодинамически стабильному, пассивному состоянию поверхности металла, при котором скорость коррозионных процессов мала. Стабильный и узкий диапазон разброса значений потенциала служит контрольной точкой для последующей оценки изменений, вызванных воздействием агрессивной среды.

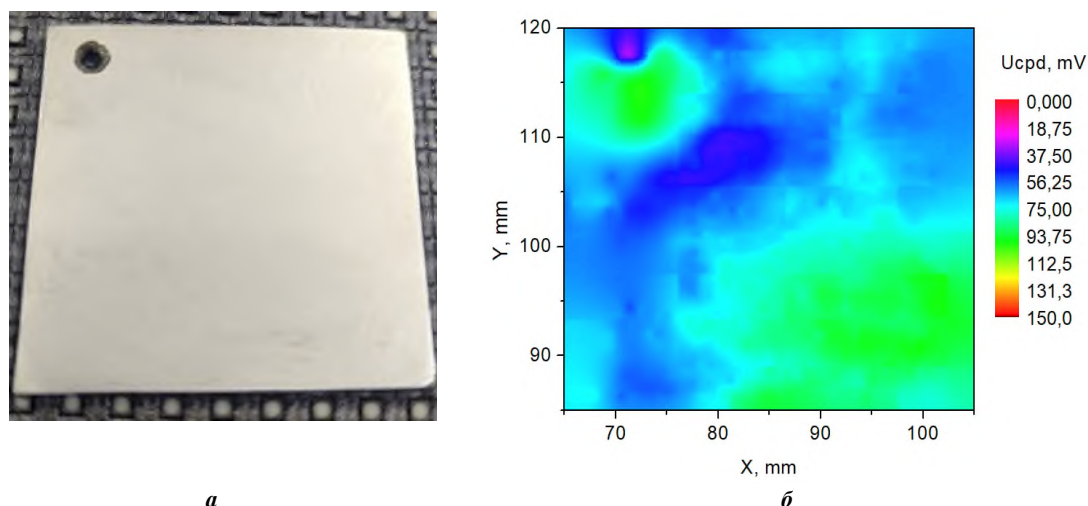


Рисунок 2. – Исходное состояние образца (а) и карта распределения поверхностного потенциала исходного образца (б)

После 15-минутного воздействия 5% раствора NaCl на поверхности образца зафиксированы первые признаки возникновения коррозионного процесса, согласованные как на макрофотографии, так и на карте КРП (рисунок 3). На макрофотографии (см. рисунок 3, а) наблюдаются слабые локальные потемнения, которые свидетельствуют о начальной стадии разрушения естественной оксидной плёнки на поверхности исследуемого образца.

На карте распределения КРП (см. рисунок 3, б) эти изменения можно проследить как выраженную область с аномально низким значением потенциала (ярко-розовая/фиолетовая зона соответствуют значениям КРП 10–30 мВ). Резкое падение потенциала на данном участке (на 20–30 мВ относительно фонового значения) свидетельствует о разрушении пассивного слоя и образовании активного анодного участка, где протекает реакция окисления железа ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$). За счет разности потенциалов между анодным центром и соседними участками (зеленая зона на карте), сохранившими катодные свойства, возникают микрогальванические элементы. Такое взаимодействие создает условия для энергетической подпитки коррозии, что стимулирует дальнейшее углубление и рост питтинга.

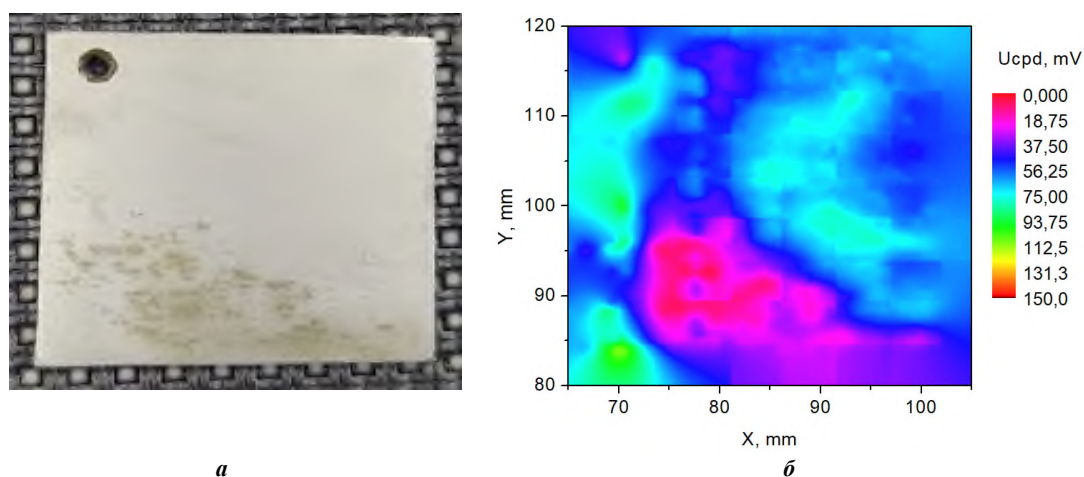


Рисунок 3. – Состояние образца (а) и карта распределения поверхностного потенциала образца (б) после 15 минут пребывания в растворе NaCl

Наблюдается разрастание первичного очага коррозии после одного часа воздействия раствора NaCl (см. рисунок 3). Анодная область, которая определяется по низким значениям РВЭ (0–30 мВ на карте распределения (см. рисунок 3, б)), показывает существенное увеличение площади очага коррозии при сохранении первоначальной конфигурации. Это прямо указывает на прогрессирующее развитие питтинга.

После восьми часов воздействия раствором NaCl на испытуемый образец наблюдается качественное изменение картины коррозионного процесса (рисунок 4). Верхняя (не погруженная в раствор) часть образца на карте распределения КРП (см. рисунок 4, б) сохраняет условно-однородный характер, который соответствует катодной зоне (зелёная зона (70–100 мВ)). Одновременно на погружённой части формируется сложная гетерогенная электрохимическая структура, представленная мозаикой из областей с резко различными значениями потенциала (экстремумы: ~150 мВ и ~0 мВ).

В зонах со значением КРП 0–20 мВ (соответствует сиреновой области на изображении, см. рисунок 4, б) продолжается активное анодное растворение металла. Области с аномально высокими значениями (красные и жёлтые пятна) совпадают по расположению с видимыми скоплениями продуктов коррозии (см. рисунок 4, а). На фотографии чётко выражена граница между покрытой продуктами коррозии погруженной частью и относительно сохранившейся верхней частью образца. Это подтверждает локализацию процесса в зоне воздействия агрессивной среды.

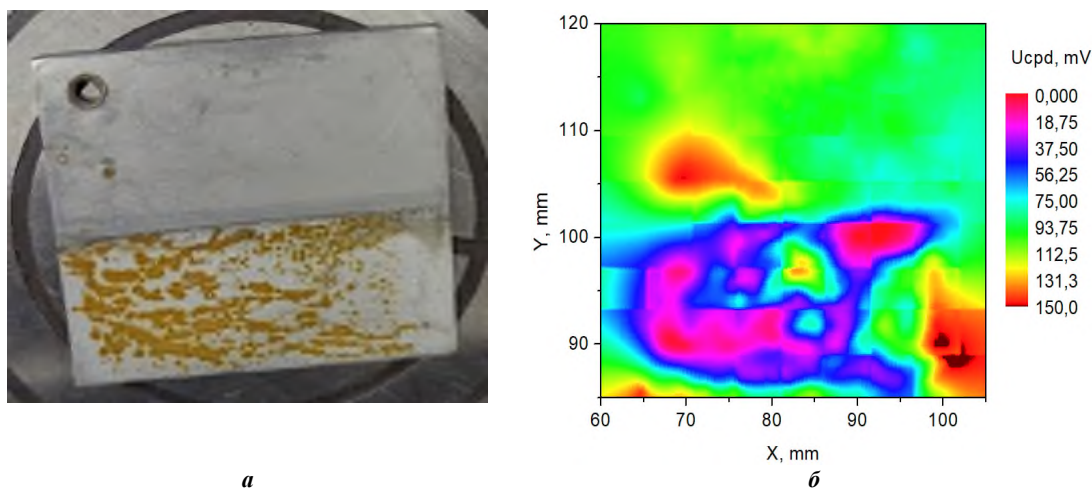


Рисунок 4. – Состояние образца (а) и карта распределения поверхностного потенциала образца (б) после 8 часов пребывания в растворе в NaCl

Повторное измерение через 6 часов после предыдущего сканирования (суммарное время экспозиции 12 часов) отражает стабилизацию общей картины при одновременном усложнении электрохимической структуры (рисунок 5, а).

Нижняя часть образца (погруженная в агрессивный раствор) характеризуется выраженной неоднородностью, представляя собой мозаику из обширных областей с низким положительным потенциалом (красные зоны) и локальных участков с высоким потенциалом (рисунок 5, б). Такая картина соответствует стадии обширной коррозии, при которой на поверхности образуется слой вторичных продуктов коррозии (оксидов и гидроксидов железа). Наблюдаемое перераспределение потенциалов свидетельствует о динамическом характере процесса: под слоем продуктов коррозии происходит непрерывная миграция и реполяризация локальных микрогальванических пар (анодных и катодных зон). Это характерно для коррозии, контролируемой диффузией реагентов через накопленные отложения.

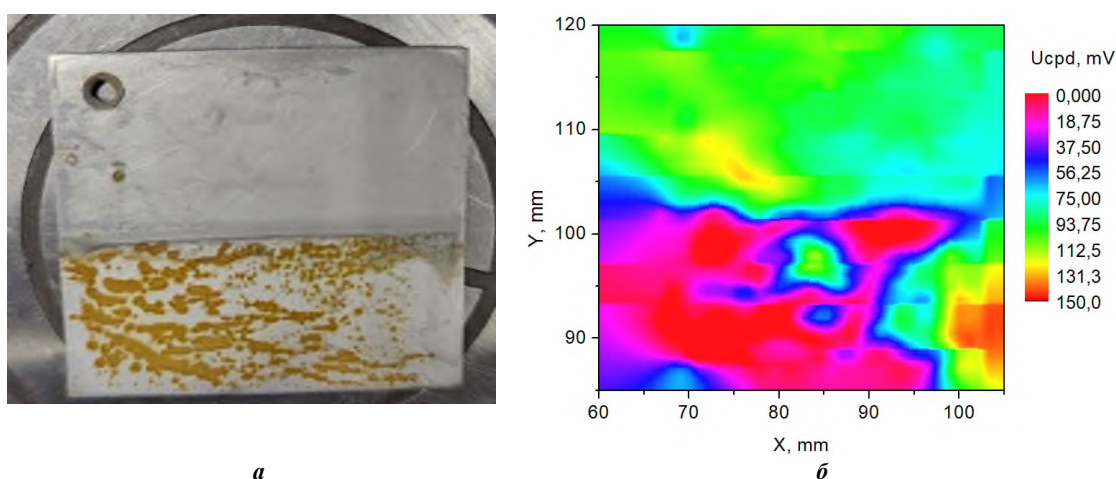


Рисунок 5. – Состояние образца (а) и карта распределения поверхностного потенциала образца (б) после 12 часов пребывания в растворе в NaCl

Заключение. В ходе эксперимента на образце из низкоуглеродистой стали Ст3 в 5% растворе NaCl продемонстрирована низкая коррозионная стойкость исследуемого материала в хлорид-содержащей среде. Метод СЗК позволил зафиксировать зарождение первого активного очага (локализованное изменение РВЭ на 40–50 мВ (величина равная, но обратная по знаку контактной разности потенциалов)) уже через 15 минут воздействия. Такой

результат значительно опережает появление макроскопических признаков разрушения. Последовательное сканирование выявило чёткую пространственно-временную динамику процесса: от единичного питтинга к разрастанию анодной зоны, а затем к формированию обширной гетерогенной области под слоем продуктов коррозии с мигрирующими анодными и катодными зонами. Метод СЗК обеспечил контрастную визуализацию границы раздела между погружённой (активно корродирующей) и надводной (относительно стабильной) частями образца, соответствующей условиям дифференциальной аэрации.

Результаты работы служат подтверждением эффективности методики сканирующей зондовой электрометрии для задач диагностики коррозии. Ключевое практическое преимущество метода СЗК заключается в его высокой чувствительности к докритическим изменениям поверхностного электрохимического потенциала. Такое преимущество позволяет выявлять очаги коррозии на стадии зарождения, задолго до появления макроскопических дефектов.

Прямым развитием представленного исследования является изучение кинетики коррозии основного металла газопровода в модельных и натуральных почвенных электролитах. Такие эксперименты позволят строить прогнозные модели коррозионного износа и разрабатывать карты коррозионной опасности для различных типов грунтов. Это может послужить основой для оптимизации ремонтных работ и продления срока безопасной эксплуатации инфраструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Почвенно-грунтовые факторы, влияющие на процесс коррозии стальных подземных трубопроводов, и их компьютерное моделирование / В.Н. Романиук, А.М. Нияковский, Н.В. Струцкий и др. // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2025. – Т. 68, № 3. – С. 230–244. DOI: 10.21122/1029-7448-2025-68-3-230-244.
2. Zharin A.L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – P. 687–720.
3. Yasakau K. Application of AFM-Based Techniques in Studies of Corrosion and Corrosion Inhibition of Metallic Alloys // Corrosion and Materials Degradation. – 2020. – Vol. 1, № 3. – P. 345–372. DOI: 10.3390/cmd1030017.
4. Влияние высокодисперсного наполнителя на адгезионные и фрикционные свойства сополимера этилена с винилацетатом / А.И. Свириденко, А.Л. Жарин, А.В. Кравцевич и др. // Трение и износ. – 2014. – Т. 35, № 4. – С. 401–411.
5. Method of evaluating corrosion resistance of metal material, method of designing alloy of high corrosion resistance, method of diagnosing corroded state of metal material, and method of operating plant: pat. US 5901071 A; заявл. 04.05.1999; опубл. 04.05.1999.
6. Wang C., Li Y., Alvarado L. Study on Electrochemical Behavior of 20# Carbon Steel with Disbonded Coating by Scanning Kelvin Probe and Local Electrochemical Impedance Spectroscopy // International Journal of Electrochemical Science. – 2020. – Vol. 15, № 6. – P. 4988–5001. DOI: 10.20964/2020.06.17.
7. Relationship between Dissolved Oxygen and Corrosion Characterization of X80 Steel in Acidic Soil Simulated Solution / S. Wang, D. Liu, N. Du et al. // International Journal of Electrochemical Science. – 2015. – Vol. 10, № 5. – P. 4393–4404. DOI: 10.1016/S1452-3981(23)06631-2.
8. Effect of iron ion diffusion on the corrosion behavior of carbon steels in soil environment / Z. Bai, K. Xiao, P. Dong et al. // RSC Advances. – 2018. – Vol. 8, № 71. – P. 40544–40553. DOI: 10.1039/C8RA08032A.
9. Corrosion Behavior of Al–Cu–RE (RE = La, Ce) Alloy Joints in Alkaline Soil Extract / F. Yan, X. Wang, X. Li et al. // International Journal of Electrochemical Science. – 2020. – Vol. 15, № 8. – P. 8012–8025. DOI: 10.20964/2020.08.07.
10. Correlation of micro-galvanic corrosion behavior with corrosion rate in the initial corrosion process of dual phase steel / H. Chen, Z. Lv, L. Lu et al. // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 15. – P. 3310–3320. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.123.
11. Localized Corrosion Occurrence in Low-Carbon Steel Pipe Caused by Microstructural Inhomogeneity / Y.-H. Lee, G. Kim, K.-M. Kim et al. // Materials. – 2022. – Vol. 15, № 5. DOI: 10.3390/ma15051870.
12. Stress corrosion cracking of X80 steel heat-affected zone in a near-neutral pH solution containing *Bacillus cereus* / B. Liu, J. Yang, C. Du et al. // npj Materials Degradation. – 2023. – Vol. 7, № 1. DOI: 10.1038/s41529-023-00333-w.
13. Sugae K., Otsuka Y., Kamimura T. Simultaneous measurement of corrosion potential and hydrogen penetration using double-head scanning Kelvin probe // Electrochemistry Communications. – 2024. – Vol. 163. DOI: 10.1016/j.elecom.2024.107717.
14. Qin M., Hu Q., Cheng Y.F. Passivation of X80 pipeline steel in a carbonate/bicarbonate solution and the effect of oxide film on hydrogen atom permeation into the steel // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 70. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.115.
15. Effect of ultrasonic power applied to micro-arc oxidation on the morphology, chemistry, wettability and electrical properties of calcium phosphate coatings on titanium / E.G. Komarova, E.B. Akimova, E.A. Kazantseva et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – Vol. 1039. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.183056.
16. Универсальный цифровой зондовый электрометр для контроля полупроводниковых пластин / А.Л. Жарин, В.А. Микитевич, А.И. Свистун и др. // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 161–172. DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172.

REFERENCES

1. Romaniuk, V.N., Niyakovskii, A.M., Strutsky, N.V., & Svistun, A.L. (2025). Pochvenno-gruntovye faktory, vliyayushchie na protsess korrozii stal'nykh podzemnykh truboprovodov, i ikh komp'yuternoe modelirovanie [Soil and ground factors affecting the steel underground pipelines corrosion process and their computer simulation]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 68(3), 230–244. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.21122/1029-7448-2025-68-3-230-244.

2. Zharin, A.L. (2010). Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology. – Heidelberg: Springer-Verlag. – P. 687–720.
3. Yasakau, K. (2020). Application of AFM-based techniques in studies of corrosion and corrosion inhibition of metallic alloys. *Corrosion and Materials Degradation*, 1(3), 345–372. DOI: 10.3390/cmd1030017.
4. Sviridenok, A.I., Zharin, A.L., Kravtsevich, A.V., & Tyavlovsky, A.K. (2014). Vliyanie vysokodispersnogo napolnitelya na adgezionnyye i friktsionnyye svoystva sopolimera etilena s vinilatsetatom [Influence of highly dispersed filler on adhesive and tribological properties of ethylene-vinyl acetate copolymer]. *Trenie i iznos*, 35(4), 401–411. (In Russ.).
5. Fujimori, H., Ishikawa, Y., Isobe, Y., Ohnaka, N., Sakai, M., & Takahashi, T. (1999). *Method of evaluating corrosion resistance of metal material, method of designing alloy of high corrosion resistance, method of diagnosing corroded state of metal material, and method of operating plant* (U.S. Patent No. US 5901071 A).
6. Wang, C., Li, Y., & Alvarado, L. (2020). Study on electrochemical behavior of 20# carbon steel with disbonded coating by scanning Kelvin probe and local electrochemical impedance spectroscopy. *International Journal of Electrochemical Science*, 15(6), 4988–5001. DOI: 10.20964/2020.06.17.
7. Wang, S., Liu, D., Du, N., Zhao, Q., Liu, S. & Xiao, J. (2015). Relationship between dissolved oxygen and corrosion characterization of X80 steel in acidic soil simulated solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 10(5), 4393–4404. DOI: 10.1016/S1452-3981(23)06631-2.
8. Bai, Z., Xiao, K., Dong, P., Dong, C., Wei, D., & Li, X. (2018). Effect of iron ion diffusion on the corrosion behavior of carbon steels in soil environment. *RSC Advances*, 8(71), 40544–40553. DOI: 10.1039/C8RA08032A.
9. Yan, F., Wang, X., Li, X., Wang, C., & Jiang, B. (2020). Corrosion behavior of Al–Cu–RE (RE = La, Ce) alloy joints in alkaline soil extract. *International Journal of Electrochemical Science*, 15(8), 8012–8025. DOI: 10.20964/2020.08.07.
10. Chen, H., Lv, Z., Lu, L., Huang, Y., & Li, X. (2021). Correlation of micro-galvanic corrosion behavior with corrosion rate in the initial corrosion process of dual phase steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 3310–3320. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.123.
11. Lee, Y.-H., Kim, G., Kim, K.-M., Ko, S.-J., Kim, W.-C., & Kim J.-G. (2022). Localized corrosion occurrence in low-carbon steel pipe caused by microstructural inhomogeneity. *Materials*, 15(5). DOI: 10.3390/ma15051870.
12. Liu, B., Yang, J., Du, C., Liu, Z., Wu, W., & Li, X. (2023). Stress corrosion cracking of X80 steel heat-affected zone in a near-neutral pH solution containing *Bacillus cereus*. *npj Materials Degradation*, 7(1). DOI: 10.1038/s41529-023-00333-w.
13. Sugae, K., Otsuka, Y., & Kamimura, T. (2024). Simultaneous measurement of corrosion potential and hydrogen penetration using double-head scanning Kelvin probe. *Electrochemistry Communications*, 163. DOI: 10.1016/j.elecom.2024.107717.
14. Qin, M., Hu, Q., & Cheng, Y.F. (2024). Passivation of X80 pipeline steel in a carbonate/bicarbonate solution and the effect of oxide film on hydrogen atom permeation into the steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 70, 1–9. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.115.
15. Komarova, E.G., Akimova, E.B., Kazantseva, E.A., Zharin, A.L., & Sharkeev, Y.P. (2025). Effect of ultrasonic power applied to micro-arc oxidation on the morphology, chemistry, wettability and electrical properties of calcium phosphate coatings on titanium. *Journal of Alloys and Compounds*, 1039. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.183056.
16. Zharin, A.L., Mikitevich, V.A., Svistun, A.I., & Pantsialeyeu, K.V. (2023). Universal'nyy tsifrovoy zondovyy elektrometr dlya kontrolya poluprovodnikovyykh plastin [Universal digital probe electrometer for monitoring semiconductor wafers]. *Prirody i metody izmerenii*, 14(3), 161–172. DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172.

Поступила 27.01.2026

APPLICATION OF THE SCANNING KELVIN PROBE METHOD FOR EARLY-STAGE CORROSION DETECTION IN PIPELINE STEEL

A. SVISTUN, K. PANTSIALEYEU, V. ROMANIUK
(Belarusian National Technical University, Minsk)

Unveiling corrosion mechanisms and enhancing material durability require a shift from evaluating integral characteristics to analyzing processes at the micro-level. This study aims to establish a correlation between the spatial distribution of the electron work function (EWF) on the steel surface and the localization of corrosion damage sites using the Scanning Kelvin Probe (SKP) method. Experiments on a pipeline steel sample in a NaCl solution demonstrated that the SKP method can detect the onset of pitting corrosion by mapping the EWF distribution. As a result, a correlation was established between local variations in the EWF and the initiation of corrosion, enabling the diagnosis of material degradation at a pre-critical stage, long before visible defects appear. Thus, this work confirms that the SKP method serves as a highly informative tool for the micro-level analysis of corrosion mechanisms. A direct continuation of this research involves applying the SKP method to study the corrosion kinetics of pipeline steel in simulated and natural soil electrolytes to develop predictive models and corrosion hazard maps.

Keywords: scanning Kelvin probe (SKP), underground gas pipelines, steel corrosion, Volta potential, work function (WF), pitting corrosion, surface potential distribution, structural steel, contact potential difference (CPD).

УДК 628.161.2:544.726

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-59-64

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГЕНЕРАЦИИ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА КЛИНОПТИЛОЛИТА
В ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ СХЕМЕ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД****Е.С. ВЕЛЮГО***(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)***ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6165-1929>**

В статье представлены результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных параметров регенерации природного цеолита клиноптилолита раствором хлористого натрия. Исследования проводились в рамках двухступенчатой технологической схемы очистки подземных вод с повышенным содержанием железа, марганца, аммонийного азота и высокими показателями перманганатной окисляемости. Установлено влияние интенсивности вторичной аэрации на рабочую обменную ёмкость цеолита. Определены оптимальные удельные расходы NaCl (300–500 г/г-экв в зависимости от исходной концентрации аммония), обеспечивающие максимальную длительность фильтроцикла. Показано, что применение вторичной аэрации с воздушно-водным соотношением 1:1 (по объёму) позволяет снизить расход регенерационного раствора в 2–5 раз по сравнению с рекомендациями производителей.

Ключевые слова: подземные воды сложного состава, двухступенчатая очистка, клиноптилолит, ионный обмен, регенерация, аммонийный азот, вторичная аэрация.

Введение. Эксплуатация систем водоподготовки для малых населенных пунктов сталкивается с проблемой обеспечения нормативного качества воды при ее сложном составе, характеризующемся одновременным присутствием соединений железа, марганца, аммонийного азота и перманганатной окисляемости. В предшествующих исследованиях автора была обоснована эффективность двухступенчатой схемы, включающей фильтрование через сорбент АС (первая ступень) и клиноптилолитовый цеолит марки Цеол¹ (вторая ступень) с предварительной аэрацией на каждой ступени [1]. Ключевая роль во второй ступени отводится процессам ионного обмена, обеспечивающим удаление аммонийного азота. Однако по мере насыщения ионообменных центров возникает необходимость регенерации цеолитовой загрузки. Цель настоящей работы – определение оптимальных параметров регенерации цеолита раствором хлористого натрия, обеспечивающих максимальную продолжительность фильтроцикла и минимальные эксплуатационные затраты в условиях реального состава подземных вод.

Материалы и методы исследования. Исследования выполнялись на пилотной фильтровальной установке, подключенной после фильтров обезжелезивания первой ступени и вторичной аэрационной колонны. В качестве фильтрующего материала использован природный клиноптилолит [2] с размером зерен 0,8–1,2 мм, объем загрузки в фильтре диаметром 0,25 м составил 25 л. Скорость фильтрования поддерживалась на уровне 10 м/ч.

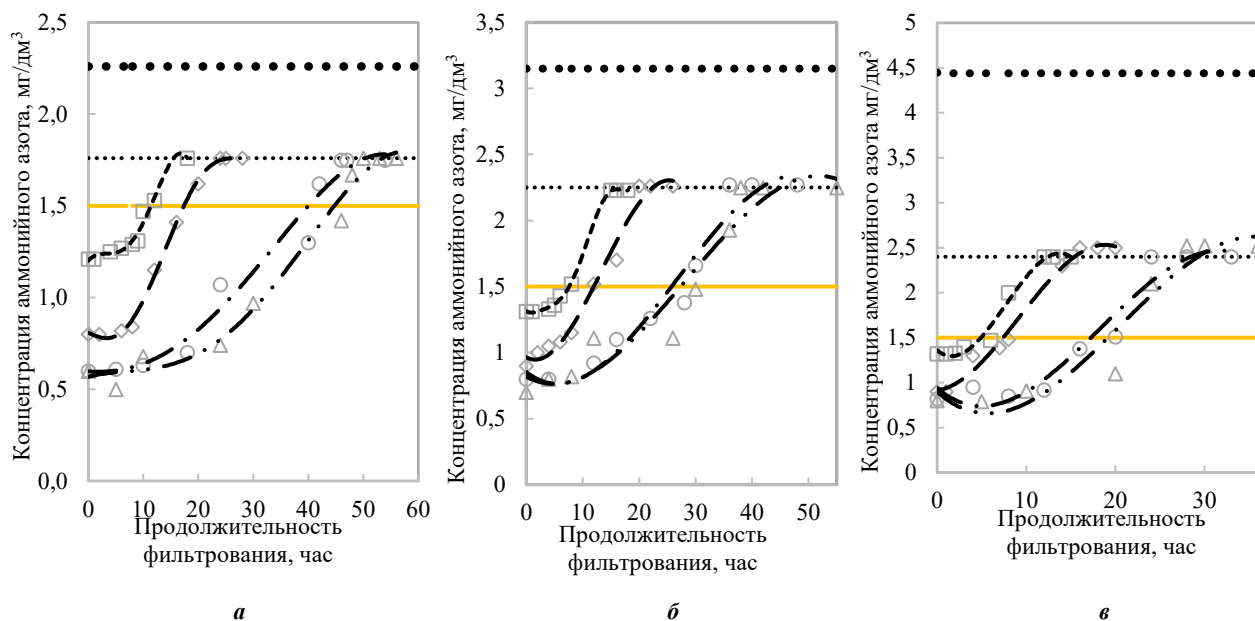
Объектами исследования выбраны три станции обезжелезивания Витебской области (объекты 1, 2, 3) с различным исходным составом (после первой ступени фильтров) подземных вод: концентрация аммонийного азота находилась в интервале от 2,26 до 4,44 мг/дм³, перманганатная окисляемость – от 4,8 до 6,8 мг О₂/дм³. Концентрации аммонийного азота в воде и фильтрате определялись в лаборатории по азоту аммонийному (NH₄-N). Для расчётов рабочей обменной ёмкости и удельного расхода соли все значения были пересчитаны в ион NH₄⁺. Все приведённые в работе концентрации, выходные кривые и расчёты даны в пересчёте на ион NH₄⁺. На стадии первичной аэрации поддерживалось воздушно-водное соотношение (3–3,5):1, обоснованное ранее проведенными исследованиями [3] как оптимальное для обеспечения полного окисления Fe²⁺ и деструкции органожелезистых комплексов. На стадии вторичной аэрации перед цеолитовым фильтром соотношение изменялось в диапазоне (0–1,5):1 для определения рационального режима доочистки.

Регенерация цеолитовой загрузки осуществлялась 8%-м (по массе) раствором хлористого натрия. Варьируемым параметром выступал удельный расход соли (от 200 до 600 г/г-экв). Эффективность регенерации оценивалась по длительности последующего фильтроцикла до достижения в фильтрате предельно допустимой концентрации аммонийного азота (1,5 мг/дм³). Рабочая обменная ёмкость цеолита рассчитывалась по стандартной методике на основе выходных кривых сорбции и ионного обмена.

Результаты и их обсуждение. Влияние вторичной аэрации на рабочую ёмкость цеолита. Экспериментально установлено, что определяющим фактором эффективности второй ступени является концентрация аммонийного азота в исходной воде. При этом уровни содержания железа, марганца и перманганатной окисляемости на выходе из установки стабильно удерживались ниже нормативных значений даже при приближении концентрации аммония к исходной.

Наиболее высокая эффективность удаления аммония достигалась при использовании вторичной аэрации с воздушно-водным соотношением 1:1 и 1,5:1 (рисунок 1). Рациональным признано соотношение 1:1, поскольку дальнейшее увеличение интенсивности аэрации незначительно повышает эффективность и становится экономически нецелесообразным.

¹ Цеолит природный: производство, поставка, применение [Электронный ресурс] // Zeol.ru: сайт. – URL: <https://zeol.ru/> (дата обращения 16.07.2025).



— норма ион-аммония
 ••••• усредненное значение ион-аммония после первой ступени
 усредненное значение изъятия ионов аммония процессом адсорбции
 - - - - 1 цикл: с регенерацией и без вторичной аэрации
 — 2 цикл: регенерация и воздушно-водяное соотношение вторичной аэрации 0,5:1
 - · - 3 цикл: регенерация и воздушно-водяное соотношение вторичной аэрации 1:1
 — · · 4 цикл: регенерация и воздушно-водяное соотношение вторичной аэрации 1,5:1

a – объект 1 ($C_{NH_4}^{исх}=2,26$ мг/дм³); *б* – объект 2 ($C_{NH_4}^{исх}=3,15$ мг/дм³); *в* – объект 3 ($C_{NH_4}^{исх}=4,44$ мг/дм³)

Рисунок 1. – Выходные кривые сорбции и ионного обмена аммонийного азота на цеолите при различном воздушно-водном соотношении

Дополнительное насыщение воды кислородом способствовало доокислению остаточных концентраций железа и марганца после первой ступени, снижению перманганатной окисляемости и, предположительно, частичному окислению аммонийного азота, что создавало благоприятные условия для последующего ионного обмена [4; 5].

Количественная оценка рабочей обменной емкости. Расчет рабочей обменной емкости цеолита (E_p , мг-экв/дм³) выполнялся по выходным кривым сорбции с учетом объема профильтрованной воды до момента достижения предельной концентрации аммония в фильтрате. Результаты для исследуемых объектов представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Экспериментальные значения рабочей обменной емкости и длительности фильтроциклов

Параметр	Объект 1 ($C_{NH_4}^{исх} = 2,26$ мг/дм ³)				Объект 2 ($C_{NH_4}^{исх} = 3,15$ мг/дм ³)				Объект 3 ($C_{NH_4}^{исх} = 4,44$ мг/дм ³)			
	1 цикл	2 цикл	3 цикл	4 цикл	1 цикл	2 цикл	3 цикл	4 цикл	1 цикл	2 цикл	3 цикл	4 цикл
Динамическая рабочая обменная емкость E_p , мг-экв/дм ³	18,3	35,6	90,5	102,8	21,1	36,9	93,2	104,8	26,9	40,0	95,0	105,9
Продолжительность фильтроцикла T , ч	12	17	40,5	46	8	12	29	30	6	8,0	19	21

Как видно из представленных данных, рабочая обменная емкость цеолита закономерно возрастает с увеличением номера фильтроцикла. Установлено, что в отсутствие вторичной аэрации (1-й цикл) значение E_p существенно зависит от исходной концентрации аммония, составляя 18,3–26,9 мг-экв/дм³. Применение вторичной аэрации ($V=1:1$, 3-й цикл) нивелирует это влияние: значения E_p для разных объектов сближаются до 90,5–95,0 мг-экв/дм³, а при дальнейшем увеличении до 1,5:1 (4-й цикл) достигают практически одинакового уровня – 102,8–105,9 мг-экв/дм³. Это свидетельствует о том, что вторичная аэрация эффективно устраняет факторы, лимитирующие ионный обмен (конкуренцию катионов и кольматацию пор), и обеспечивает стабильную работу фильтра независимо от исходного состава воды. Абсолютные значения E_p остаются на 41–53% ниже паспортных показателей (220 мг-экв/дм³)²,

² Наполнители для фильтров: цеолит природный [Электронный ресурс] // Гидросити: сайт. – URL: <https://gidrositi.ru/catalog/napolniteli/tseolit/> (дата обращения 16.07.2025).

Необходимое количество $\text{NaCl } P_c$, кг, на одну регенерацию пилотного фильтра рассчитывалось по формуле³:

$$P_c = \frac{f_1 \cdot H_k \cdot E_p \cdot a_c}{1000}, \quad (1)$$

где f_1 – площадь пилотного фильтра, 0,05 м²;

H_k – высота слоя загрузки, 0,5 м;

E_p – рабочая обменная емкость катионита, мг-экв/дм³ (см. таблицу 1);

a_c – удельный расход соли на регенерацию, г/г-экв (варьировалась в диапазоне 100–300 г/г-экв в зависимости от исходного состава воды на объекте).

Удельное количество хлористого натрия ($\text{NaCl } P_{уд}$) (кг/м³ загрузки) находили делением количества $\text{NaCl } P_c$ на одну регенерацию пилотного фильтра на объем фильтрующей загрузки (0,025 м³).

Удельный расход 8%-го регенерирующего раствора $\text{NaCl } Q_{уд}$, м³, на 1 м³ цеолитовой загрузки определяли по формуле:

$$Q_{уд} = \frac{100 \cdot P_c}{1000 \cdot b \cdot \rho \cdot V_{\phi}}, \quad (2)$$

где b – концентрация раствора NaCl , 8 мас.%;

ρ – плотность 8%-го раствора NaCl , принята равной 1,055 т/м³;

V_{ϕ} – объем фильтрующей загрузки, м³.

Результаты для регенерации пилотного фильтра второй ступени с воздушно-водным соотношением 1:1 представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Потребность в реагентах для регенерации цеолитовой загрузки

Удельный расход соли на 1 г-экв рабочей обменной емкости цеолита, г/г-экв	Количество $\text{NaCl } P_c$, кг, на одну регенерацию цеолитового пилотного фильтра / Удельное количество $\text{NaCl } P_{уд}$, кг/м ³ , на одну регенерацию 1 м ³ цеолита			Расход Q_c , м ³ , на пилотный фильтр / Удельный расход $Q_{уд}$, м ³ на 1 м ³ загрузки		
	объекта 1	объекта 2	объекта 3	объекта 1	объекта 2	объекта 3
200	0,45/18,11	–	–	0,006/0,23	–	–
300	0,68/27,16	0,70/27,96	–	0,008/0,34	0,009/0,35	–
400	0,91/36,22	0,93/37,28	0,95/38,02	0,011/0,45	0,012/0,47	0,012/0,48
500	–	1,17/46,60	1,19/47,52	–	0,015/0,58	0,015/0,59
600	–	–	1,43/57,03	–	–	0,018/0,71

Примечание. Прочерк (–) означает, что данная комбинация параметров на объекте не исследовалась.

Удельный расход регенерационного раствора в условиях применения вторичной аэрации составил 0,23–0,71 м³/м³ загрузки, что в 2–5 раз ниже значений, рекомендуемых производителями цеолита (1,2–1,5 м³/м³). Снижение расхода реагента обусловлено тем, что вторичная аэрация способствует доокислению остаточного Fe^{2+} и деструкции органожелезистых комплексов, которые в отсутствие аэрации являются основными агентами коагуляции, блокирующими микропоры цеолита [10]. Удаление этих компонентов предотвращает необратимое накопление загрязнителей в поровом пространстве, снижает конкурентное влияние при ионном обмене и позволяет сократить расход реагента без потери эффективности очистки. Важно отметить, что снижение расхода регенерационного раствора не сопровождается деградацией сорбционных свойств цеолита в длительной перспективе.

Восстановление рабочей способности цеолитовой загрузки состоит из трёх этапов: предварительная промывка обратным током воды, собственно регенерация раствором хлористого натрия и отмывка прямым током воды.

Продолжительность регенерации 8%-м раствором NaCl принята равной 30–45 мин. в соответствии с рекомендуемыми режимами производителей. Это значение обеспечивает полное вытеснение ионов аммония из цеолитовой загрузки при минимальном расходе реагента и промывных вод, что подтверждено экспериментальными данными по кинетике восстановления обменной емкости.

Таким образом, предложенная методика регенерации обеспечивает эффективное восстановление цеолитовой загрузки, позволяет сократить расход реагентов и продлить ресурс фильтрующего материала.

³ Проектирование сооружений водоподготовки: пособие к техническому кодексу установившейся практики: П1-2019 к ТКП 45-4.01-320-2018 (33020) / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Научно-проектно-производственное республиканское унитарное предприятие «Стройтехнорм». – Минск, 2020. – 133 с.

Заключение. Экспериментально подтверждено, что применение вторичной аэрации с воздушно-водным соотношением 1:1 перед цеолитовым фильтром позволяет повысить эффективность удаления аммонийного азота и снизить нагрузку на ионообменную загрузку.

1. Установлены значения рабочей обменной емкости цеолита для вод с различным содержанием аммония, составляющие 90,5–105,9 мг-экв/дм³ при воздушно-водном соотношении более 1:1, что на 41–46% ниже паспортных показателей, определенных производителем на модельных растворах, содержащих только аммоний в дистиллированной воде. Снижение обусловлено конкурентным влиянием сопутствующих загрязнителей (ионов железа, марганца, органических соединений).

2. Определены оптимальные удельные расходы хлористого натрия для регенерации в зависимости от исходной концентрации аммония: 300 г/г-экв при $C_{\text{исх}} \leq 2,5$ мг/дм³, 400 г/г-экв при $2,5 < C_{\text{исх}} \leq 3,5$ мг/дм³, 500 г/г-экв при $3,5 < C_{\text{исх}} \leq 5,0$ мг/дм³.

3. Установлено, что оптимальным воздушно-водным соотношением на стадии вторичной аэрации является 1:1, поскольку дальнейшее увеличение интенсивности аэрации не приводит к значимому приросту эффективности удаления аммонийного азота и экономически нецелесообразно.

4. Показано, что применение вторичной аэрации с воздушно-водным соотношением 1:1 перед цеолитовым фильтром позволяет существенно снизить удельный расход 8%-го раствора NaCl для регенерации до 0,23–0,71 м³/м³ загрузки, что в 2–5 раз ниже типовых рекомендаций производителей цеолита (1,2–1,5 м³/м³). Снижение расхода реагента обусловлено уменьшением конкурентного влияния железа, марганца и органических веществ благодаря доокислению и деструкции их комплексов на стадии вторичной аэрации.

Полученные результаты и рекомендации по регенерации цеолитовой загрузки могут быть применены при проектировании и эксплуатации станций водоподготовки малой производительности, использующих двухступенчатые схемы очистки подземных вод сложного состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yushchenko V., Velyugo E., Romanovski V. Influence of ammonium nitrogen on the treatment efficiency of underground water at iron removal stations // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2023. – Vol. 22. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100943.
2. Применение цеолитов клиноптилолитового типа для очистки природных вод [Электронный ресурс] / Н.И. Ватин, В.Н. Чечевичкин, А.В. Чечевичкин и др. // *Magazine of Civil Engineering*. – 2013. – № 2. – С. 81–88. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tseolitov-klinoptilolitovogo-tipa-dlya-ochistki-prirodnih-vod> (дата обращения 24.02.2026).
3. Велюго Е.С., Ющенко В.Д. Влияние степени аэрации воды на удаление железа в напорных фильтрах с песчаной загрузкой и сорбентом АС при обработке воды сложного состава // *Инженерно-экологические аспекты и перспективы развития систем водоснабжения и водоотведения: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 28 марта 2025 г.* / Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: А.А. Волчек [и др.]; науч. ред. А. А. Волчек, О. П. Мешик, С. В. Андреюк. – Брест: БрГТУ, 2025. – С. 26–31.
4. Kordala N., Wyszowski M. Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications // *Molecules*. – 2024. – Vol. 29, Iss. 5. – URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/29/5/1069> (дата обращения 24.02.2026).
5. A Study of Using Natural Sorbent to Reduce Iron Cations from Aqueous Solutions / I. Pandova, M. Rimar, A. Panda et al. // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2020. – Vol. 17, № 10. DOI: 10.3390/ijerph17103686.
6. Tosun I. Ammonium removal from aqueous solutions by clinoptilolite: determination of isotherm and thermodynamic parameters and comparison of kinetics by the double exponential model and conventional kinetic models // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2012. – № 9(3). – P. 970–984. DOI: 10.3390/ijerph9030970.
7. Investigation of ammonium removal from aqueous solutions by ion exchange using natural and modified clinoptilolite / A.R. Rahmani, A.H. Mahvi, A.R. Mesdaghinia et al. // *Global NEST Journal*. – 2006. – № 8(2). – P. 146–153.
8. Recovery of Ammonium Sulfate Solution by Regeneration of Loaded Clinoptilolite / S. Wasielewski, E. Rott, R. Minke et al. // *Nanomaterials*. – 2022. – № 12(3). DOI: 10.3390/nano12030525.
9. Watanabe Y., Moriyoshi Y. Ammonium ion exchange behaviors on natural clinoptilolites // *Journal of the Society of Inorganic Materials*. – 2003. – № 10(Suppl.). – P. 217–222.
10. Велюго Е.С., Ермак А.А., Ющенко В.Д. Модификация структурных и сорбционных свойств цеолита в процессе удаления ионов аммония и железа из подземных вод // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки*. – 2025. – № 3. – С. 28–32. DOI: 10.52928/2070-1683-2025-42-3-28-32.

REFERENCES

1. Yushchenko, V., Velyugo, E., & Romanovski, V. (2023). Influence of ammonium nitrogen on the treatment efficiency of underground water at iron removal stations. *Groundwater for Sustainable Development*, 22. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100943.
2. Vatin, N.I., Chechevichkin, V.N., Chechevichkin, A.V., & Shilova, E.S. (2013). Primenenie tseolitov klinoptilolitovogo tipa dlya ochistki prirodnih vod [Application of clinoptilolite-type zeolites for natural water treatment]. *Magazine of Civil Engineering*, (2), 81–88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tseolitov-klinoptilolitovogo-tipa-dlya-ochistki-prirodnih-vod>. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Velyugo, E.S., & Yushchenko, V.D. (2025). Vliyanie stepeni aeratsii vody na udalenie zheleza v napornykh fil'trakh s pesochnoy zagruzkoj i sorbentom AS pri obrabotke vody slozhnogo sostava [Influence of water aeration degree on iron removal in pressure filters with sand and AS sorbent media when treating water of complex composition]. In A.A. Volchek, O.P. Meshik, & S.V. Andreyuk (Eds.) *Inzhenerno-ekologicheskie aspekty i perspektivy razvitiya sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya: sb. nauch. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* (26–31). Brest: Brest State Technical University. (In Russ.).

4. Kordala, N., & Wyszowski, M. (2024). Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications. *Molecules*, 29(5). URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/29/5/1069>.
5. Pandova, I., Rimar, M., Panda, A., Valicek, J., Kushnierova, M., & Garmicharova, M.A. (2020). A Study of Using Natural Sorbent to Reduce Iron Cations from Aqueous Solutions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(10). DOI: 10.3390/ijerph17103686.
6. Tosun I. (2012). Ammonium removal from aqueous solutions by clinoptilolite: determination of isotherm and thermodynamic parameters and comparison of kinetics by the double exponential model and conventional kinetic models. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 9(3), 970–984. DOI: 10.3390/ijerph9030970.
7. Rahmani, A.R., Mahvi, A.H., Mesdaghinia, A.R., & Nasser, S. (2006). Investigation of ammonium removal from aqueous solutions by ion exchange using natural and modified clinoptilolite. *Global NEST Journal*, 8(2), 146–153.
8. Wasielewski, S., Rott, E., Minke, R., & Steinmetz, H. (2022). Recovery of Ammonium Sulfate Solution by Regeneration of Loaded Clinoptilolite. *Nanomaterials*, 12(3). DOI: 10.3390/nano12030525.
9. Watanabe, Y., & Moriyoshi, Y. (2003). Ammonium ion exchange behaviors on natural clinoptilolites. *Journal of the Society of Inorganic Materials*, 10(Suppl.), 217–222.
10. Velyugo, E.S., Ermak, A.A., & Yushchenko, V.D. (2025). Modifikatsiya strukturnykh i sorbtsionnykh svoystv tseolita v protsesse udaleniya ionov ammoniya i zheleza iz podzemnykh vod [Modification of structural and sorption properties of zeolite during the removal of ammonium and iron ions from groundwater]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*, (3), 28–32. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.52928/2070-1683-2025-42-3-28-32.

Поступила 20.03.2026

OPTIMIZATION OF NATURAL ZEOLITE CLINOPTILOLITE REGENERATION IN A TWO-STAGE GROUNDWATER TREATMENT SCHEME

E. VELYUGO

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article presents the results of experimental studies aimed at determining optimal regeneration parameters of natural clinoptilolite zeolite using a sodium chloride solution. The research was conducted within a two-stage technological scheme for groundwater treatment characterized by elevated concentrations of iron, manganese, ammonium nitrogen, and high permanganate oxidizability. The influence of secondary aeration intensity on the operating exchange capacity of zeolite was established. Optimal specific NaCl consumption rates (300–500 g/g-eq depending on the initial ammonium concentration) were determined, ensuring maximum filter run duration. It was shown that the application of secondary aeration with an air-to-water ratio of 1:1 (by volume) makes it possible to reduce the consumption of regeneration solution by 2–5 times compared to manufacturers' recommendations.

Keywords: *groundwater of complex composition, two-stage water treatment, clinoptilolite, ion exchange, regeneration, ammonium nitrogen, secondary aeration.*

УДК [725.1:272+711(476.5-21)]“16/18”

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-65-77

**ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПОЛОЦКОГО ИЕЗУИТСКОГО КОЛЛЕГИУМА В XVII – НАЧАЛЕ XIX ВВ.
И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРУ ПОЛОЦКА****Г.И. ЗАХАРКИНА¹⁾, А.А. СОЛОВЬЁВ²⁾**¹⁾ *Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,*²⁾ *Национальный Полоцкий историко-культурный музей-заповедник)*

В статье изучается влияние Полоцкого иезуитского коллегиума на развитие архитектуры Полоцка в XVII – начале XIX вв. Эти процессы связаны с возрождением каменного строительства в городе, его влиянием на градостроительную ситуацию и развитие монументального строительства после окончания Ливонской войны. Для этого рассматриваются и сопоставляются строительные изделия и материалы, планировочные и конструктивные решения ряда построек, возведённых на территории коллегиума и в Полоцке в XVII в.

В годы Северной войны (1701–1721 гг.) иезуиты не только сохранили коллегиум от разрушения, но и способствовали его расширению и благоустройству. В условиях общего упадка материальной культуры Полоцка иезуитская резиденция становилась главным центром городской жизни.

В первой трети XVIII в. иезуитами созданы предпосылки для масштабного строительства классического ансамбля коллегиума. Оно началось со второй трети XVIII в. и уже велось совсем по иным принципам, чем в предыдущее столетие. Проведённое исследование и сопоставление иезуитских наработок с архитектурно-планировочными и конструктивными решениями ряда капитальных гражданских и культовых построек города, возведённых в XVIII вв., позволяет выявить степень их влияния на градостроительство и архитектуру Полоцка.

Ключевые слова: *Полоцкий иезуитский коллегиум, барокко, классицизм, строительные материалы, конструкции, архитектура.*

Введение. Вопрос влияния Полоцкого иезуитского коллегиума на архитектуру и градостроительство Полоцка заслуживает серьёзного изучения. До 1597 г. положение ордена в городе было шатким. Только после смерти их главного противника, полоцкого воеводы Николая Монвида Дорогостайского и назначения вместо него Андрея Сапеги, убеждённого католика и их сторонника, ситуация начала меняться в пользу ордена.

Росту влияния иезуитского ордена в Полоцке, укреплению его экономических позиций и, как следствие, созданию предпосылок для возрождения кирпичного строительства содействовал ряд факторов. Во-первых, это поддержка ряда представителей государственной элиты и городского нобилитета. Во-вторых, в глазах руководства ордена полоцкому коллегиуму отводилась важная миссионерская роль в проповеди католицизма и в сопровождении им новой барочной культуры и идеологии «сарматизма» в главном оплоте православия на землях Великого княжества Литовского – Полоцке. В-третьих, основанный иезуитами коллегиум постепенно расширялся и пополнялся братьями, многие из которых были из столичной Вильни, где орденом велись активные работы по монументальному строительству и реконструкции корпусов Академии и, как следствие, всегда имелись квалифицированные архитекторы, мастера и рабочие, способные изготавливать качественные строительные материалы и возводить масштабные кирпичные здания, умело адаптируя к ним сохранившиеся конструкции предшествовавших построек. Это позволило обеспечить приток нужных специалистов в Полоцк, поскольку со столицей его связывал прямой сухопутный Виленский тракт, начинавшийся от левого берега Западной Двины.

Важен и тот факт, что существовавшие в Полоцке в эпоху Полоцкого княжества традиции монументального зодчества, как и на всей территории современной Беларуси, были полностью прерваны и утеряны уже как четыре столетия. Но содействовала возрождению каменного строительства и недавно завершившаяся Ливонская война, после которой большую часть города приходилось строить с «чистого листа». Иезуитам фактически всё приходилось начинать с «нуля». Также определённую роль в создании предпосылок для развёртывания самостоятельного кирпичного строительства в полоцком коллегиуме могла играть необходимость срочного восстановления и главной православной святыни, переданной иезуитам Стефаном Баторием, – древнего Спасского храма, построенного преподобной Евфросиньей Полоцкой. Бережное к нему отношение значительно подняло бы авторитет иезуитов в глазах полочан.

Все эти факторы содействовали тому, что иезуиты фактически оказались у истоков возрождения монументального строительства в Полоцке и сохраняли в данной сфере своё лидерство в последующие столетия. Важным условием для развития капитального строительства в Полоцке стало производство кирпича, изразцов, черепицы и, позже, стекольное производство. Оно сначала осваивалось на территории иезуитских имений и городских «юрдиков». По данным Иежи Пашенды 1635 г., у полоцких иезуитов создаётся первая «цегельня» – кирпичный завод. Самые ранние известные упоминания общественных и частных «цегелен» Полоцка относятся по Магистратским книгам к 1650 г. [1, с. 272; 2, с. 50].

Первые 20 лет существования коллегиума, пока иезуиты не наладили производства в собственных имениях, они многое закупали или заказывали у городских ремесленников, поэтому до конца XVI в. становление и развитие материальной культуры ордена проходило в русле развития городской. Прежде всего, это относилось к ряду массовых видов гончарной и бондарной продукции – кухонной посуде.

Так, по мере укрепления их экономической базы и роста авторитета ордена его влияние на архитектуру и материальную культуру Полоцка неуклонно возрастало. Невероятная мобильность братьев, постоянные переходы из одного коллегиума в другой обеспечивали быструю циркуляцию новейших наработок и достижений в области науки и культуры Европы [3, с. 66].

Основная часть. Будучи главной витриной католической церкви во многоконфессиональном Полоцке (с преобладанием православного и протестантского населения), иезуитский коллегиум стал оплотом католицизма и барочной культуры [2, с. 29]. Первые изменения в материальной культуре Полоцка под воздействием его специфических черт начались со второго десятилетия XVII в., далее они только активизировались и усиливались.

Наиболее ярко это видно на примере изразцов. Так, для периода Ренессанса был характерен монументальный и ясный четырёхсторонний узор пластин с мотивами «кованого металла». Иезуиты противопоставили ему принципиально новый по построению «ковровый» орнамент. В Великое княжество Литовское подобные изделия проникли через Польшу, где аналогичные пластины датированы XVI – началом XVII вв. Первые «ковровые» изделия появились в столичной Вильне. Возможно, их привезли первые приехавшие туда иезуиты. Для изучения орнаментов пластин Полоцка особый интерес представляют изразцы, найденные археологами в Вильнюсском Нижнем Замке. Таким образом, новые виды узоров изразцов получали сначала распространение в Вильне – столице Великого княжества Литовского – и отсюда уже проникали в города, монастыри и имения по всему государству [4, с. 89].

Оттуда первые образцы «коврового орнамента» в Полоцк и привезли иезуиты. Обломки матриц для оттиска «коврового» и «аркаатурного» орнамента найдены Д.В. Дуком в фундаменте одной из печей коллегиума. Это говорит, что на его территории была небольшая гончарная мастерская, где заинтересовавшимся новшеством мастерам помогли освоить специфику производства изделий с новым орнаментом (ваза с цветами в непрерывных вогнуто-выгнутых обрамлениях), получившим массовое распространение в Полоцке [4, с. 89]. Скоро данный вид «ковровых» изразцов получил широкое применение в строительстве печей горожан, говорившее о том, что данное иезуитское новшество ими (в большинстве своём) было быстро принято. Подобная ситуация сложилась и с «иезуитскими» изразцами (имевшими монограмму ордена). Появившись с 30-х гг. XVII в., они пользовались огромным спросом у полочан, целиком сложенные печи (или имевшие их единичные вставки) стали в жилых домах обычным делом. Это также могло указывать на то, что иезуитам удалось наладить массовое производство изделий с нужным им орнаментом и максимально снизить на них цену. Среди найденных в Полоцке фрагментов преобладали терракотовые и глазурованные изделия, в то время как покрытые ангобом встречаются реже. Уникальной находкой при изучении коллегиума стал обломок полихромной пластины с коричневыми надписями, зеленоватыми цветками и рамкой по белому фону. Единичность находки позволяет предполагать, что данные изделия рассчитывались на их использование в парадных залах дворцов городского нобилитета. Тем самым строительство печей с «иезуитскими» и «ковровыми» изразцами, которые ненавязчиво, но настойчиво несли бы горожанам определённый идейный посыл, стало доступным для самых широких слоёв жителей Полоцка. Кроме изразцов с «ковровым» орнаментом у горожан появились и полы, выполненные из терракотовых и глазурованных фигурных плиток в аналогичном стиле¹ [5, с. 15].

После войны России с Речью Посполитой (1654–1667 гг.) материальная культура как иезуитского коллегиума, так и всего Полоцка переживала кризис. Только к концу XVII в. иезуитам удалось частично восстановить свою производственную и экономическую базу, о чём говорит пристройка к остаткам кирпичной сакристии и корпуса новых сводчатых помещений для библиотеки «скромного» коллегиума после пожара 1682 г. В Полоцке свидетельством начинающегося послевоенного восстановления стало возведение на старом подвале будущего Домака Петра Первого, завершившееся в 1692 г. Менее болезненный, но чувствительный удар по восстанавливающейся материальной культуре Полоцка нанесли события Северной войны (1700–1721 гг.). Иезуитам в это время удалось не только частично сохранить свой производственный и строительный потенциал, но и вести капитальное строительство из материалов вторичного использования – пристраиваются новые кирпичные помещения к библиотеке, каменные ворота со стороны рынка, ряд гипocaustов и кирпичных оснований для деревянных построек [6, с. 24–25].

Одновременно мастера, работавшие на стройках коллегиума, могли принимать косвенное участие в возобновлении капитального строительства в Полоцке. Об этом говорят как строительные материалы, так и некоторые

¹ НПГКМЗ КП 36689 фрагмент полихромного изразца с иезуитской символикой.

НПГКМЗ КВФ 622/380 матрица для прорезного изразца наверху.

НПГКМЗ КВФ 622/394 матрица для стенового изразца с изображением двухголового орла.

НПГКМЗ КВФ 622/395 матрица для стенового изразца с изображением двухголового орла.

НПГКМЗ КВФ 622/427 матрица для углового стенового изразца с мотивами «кованного» металла.

НПГКМЗ КВФ 000978/100 фигурная плитка зелёно-глазурированная.

НПГКМЗ КВФ 000978/101 фигурная плитка зелёно-глазурированная.

НПГКМЗ КВФ 000978/102 фигурная плитка зелёно-глазурированная.

НПГКМЗ КВФ 000978/103 фигурная плитка зелёно-глазурированная.

НПГКМЗ КВФ 000978/104 фигурная плитка зелёно-глазурированная.

НПГКМЗ КВФ 000978/105 фигурная плитка зелёно-глазурированная.

НПГКМЗ КВФ 040215 фигурная плитка.

конструктивные элементы этого здания. Например, для ремонта или перекладки пола в доме (Домик Петра Первого) были использованы массивные квадратные плитки с серой лицевой поверхностью, аналогичные плитам в зданиях коллегиума [6, с. 25]. О косвенном участии иезуитов в восстановлении здания говорят и некоторые конструктивные приёмы, использованные строителями. По образцу кирпичного подвала библиотеки иезуитского коллегиума устраиваются окна воздухопроводов подвала. В стенах этажа здания также устраиваются небольшие, но глубокие ниши для светильников [7, с. 26; 2, с. 81]. У иезуитов могли заказать изготовление медальона с надписью и датой возведения нового кирпичного верха здания [2, с. 83–84].

Таким образом, постоянные ремонтно-восстановительные работы на территории коллегиума последней трети XVII – первой трети XVIII вв., как и прибытие ряда квалифицированных иезуитов архитекторов и мастеров из других коллегиумов, стали основой для развития и накопления передового архитектурно-строительного опыта, пригодившегося для подготовки к строительству костёла и зданий существующего ансамбля. Важным обстоятельством был тот факт, что предстоящая масштабная стройка требовала огромных человеческих ресурсов. Поэтому к ряду работ руководством ордена привлекались не только зависимые от иезуитов крестьяне и ремесленники, но также городские мастера и подчинённые им «хлопцы», которые в ходе этих работ могли осваивать иезуитские стилистические, культурные, архитектурные, строительные, планировочные наработки, воплощая их потом в ходе работ на стройках Полоцка [7, с. 247].

Завершение восстановительного периода в развитии архитектурного ансамбля Полоцкого иезуитского коллегиума, приток новых братьев и привнесение ими новых наработок в сфере архитектуры, строительства и материальной культуры, как и изменения в подходах к строительству, привело к необходимости создания масштабного гармоничного ансамбля. Это способствовало тому, что в первой трети XVIII в. полоцкие иезуиты стандартизировали и первыми наладили массовое производство основных строительных материалов – кирпича, плиток пола, изразцов и черепицы. Требовалось обеспечить материалом не только масштабное возведение существующих ныне корпусов коллегиума, но и строящиеся объекты в принадлежавших ему имениях. Часть продукции продавалась в город.

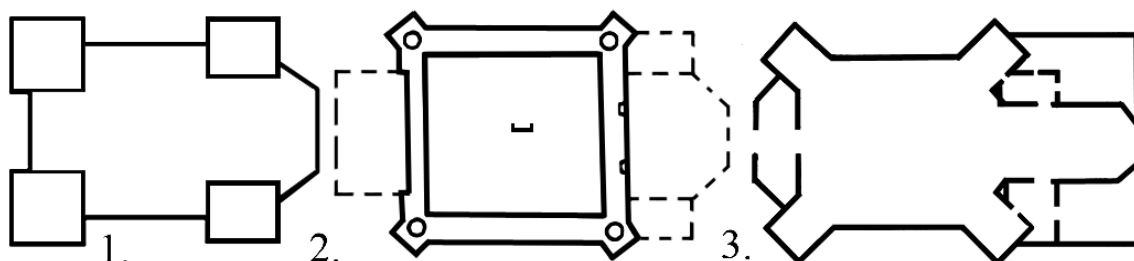
Корпуса нового иезуитского коллегиума, как и печи в их кельях, возводились по проекту архитектора иезуита Якуба Руоффа [1, с. 279]. Благодаря мастерам, работавшим на этой стройке, в Полоцке также появились и получили распространение новые виды и конструкции печей, создававшихся под «гданьским» влиянием [5, с. 67, 73, 74]. В корпусах коллегиума это были изящные сооружения, сложенные из изделий с медальонами и профилями различной конфигурации, некоторые из которых имеют близкие аналогии в Польше [5, с. 39, 74, 80, 81]. Сооружения, возводимые в домах горожан, были скромнее и меньше в размерах, их основания были в пределах 1,5×1,0 м. В составе печей полочан одновременно могли быть использованы новые изделия и изразцы «старого образца» с рельефным растительно-геометрическим и геральдическим орнаментом в одноступенчатой рамке [5, с. 73]. Подобные печи, датированные концом XVII в. – началом XVIII вв., обнаружены Н.И. Зданович (ул. Нижне-Покровская, 35), А.А. Соловьёвым (ул. Нижне-Покровская, 19) [8, с. 97: рисунок 35; 9, с. 153].

С набиравшим силу иезуитским строительством связано и распространение в Полоцке черепичного покрытия крыш. Первый положительный опыт её применения был связан со строительством кирпичной сакристии, пережившей пожар 1643 г., после этого городская элита старалась крыть черепицей и свои дома. В частности, будущий домик Петра Первого имел черепичное покрытие. Ряд обломков плоской черепицы XVII в. найден при изучении Софийского собора и базилианского монастыря при нём. Будучи под идейным влиянием иезуитского ордена, базилиане первыми осваивали их новшества [2, с. 27]. Появившаяся на рубеже столетий голландская или волнистая черепица также впервые была опробована иезуитами, в частности при возведении крыш аптеки (1717–1720 гг.) и костёла св. Стефана (1733–1750 гг.). С началом строительства зданий существующего ансамбля её производство было поставлено иезуитами на поток. Это позволило не только обеспечивать строительные объекты ордена её достаточным количеством, но и продавать горожанам. Косвенно об этом говорят находки обломков подобных изделий со знаками на шипах на месте дома генерал-губернатора (они имеют полные аналогии в материалах иезуитского коллегиума). Это здание возвели после 1783 г. на кирпичных фундаментах более старых зданий XVII–XVIII вв., расположенных в виде буквы «П». По предположению археолога Д.В. Дука они относились к архитектурному ансамблю ратуши [10, с. 226: рисунок 3.3.22 и с. 229: рисунок 3.3.26]. На них первоначально и могла лежать закупленная у иезуитов черепица, после чего её частично вновь использовали на крыше новостройки. Ещё в конце XIX в. ряд построек бернардинского и базилианского монастырей имел черепичные крыши.

Первоначально черепичное покрытие, вероятно, было и у православного Богоявленского собора, который начинали строить как барочное сооружение, но достраивали и реконструировали в 1839 г. уже в стиле классицизма. Довольно скоро черепичные кровли в Полоцке стали популярны, поскольку налажилось их производство в казённых и частных «заводах». Черепичные крыши делали даже на небольших деревянных домах ещё в XIX в. [11, с. 24, 80]. Привлекало к ордену людей и устройство стекольной гуты на территории коллегиума. Работавшие в ней мастера уже в середине XVIII в. (до 1765 г.) производили стекло высочайшего качества и могли не только соперничать с мануфактурами Уречья и Налибок, основанными Радзивиллами, а также с предприятием Гродно, обеспечивая своей продукцией коллегиум, но и работать на заказ. Ситуация изменилась только к 1786 г., когда в описании полоцкого наместничества упоминалось создание множества стекольных заводов [24, с. 69, 89–102].

Имело место и обратное воздействие местных традиций на иезуитское строительство. Об этом говорит появление костёлов необычной формы. Они имели центрическую композицию, отдалённо напоминали пятикупольные православные храмы. Их появлению содействовал ряд факторов. Во-первых, прообразом для них мог стать православный храм св. Петра и Павла на Верхнем замке в Полоцке, который даже после неоднократной гибели в пожарах и войнах отстраивался в виде здания с четырьмя башнями (и центральным куполом?) по углам (рисунок 1: 1). Его контуры были отражены на фиксационных планах Полоцка, относящихся к 1778 и 1786 гг. [10, с. 226: рисунок 3.3.22; 12]. Первоначально время возведения найденного нами фундамента костёла мы отнесли к восстановительному периоду, последовавшему за разрушением коллегиума от пожара после 1643 г. [6, с. 21–22]. Завершение исследования территории коллегиума, как и выявление новых письменных сведений о нём, говорят о том, что храм возвели раньше, ещё в 1636 г., и восстанавливали (сгоревшие части) после пожаров на старом кирпичном фундаменте. Во-вторых, ещё одним фактором, который привел к созданию центрических костёлов, было влияние барочного стиля, который предусматривал изысканные (криволинейные) очертания и планы сооружений [12, с. 353]. Строя в 1636 г. (или 1635 г.?) костёл на территории иезуитского коллегиума, Валентин Будако, по всей видимости, взял за основу планировку центральной части храма квадрат, сориентировав угловые башни по его диагоналям под 45° относительно его сторон [6, с. 21–22] (рисунок 1: 2). Можно предположить, что храм освятили в честь Св. Казимира, покровителя католиков Литвы. Окончательно храм был уничтожен в годы войны России с Речью Посполитой (1654–1667 гг.). В дальнейшем план или рисунок данного сооружения мог быть выявлен архитектором иезуитов Григорием Энгелом, которому поручили строительство иезуитского костёла в Слуцке. Он мог сохраниться среди бумаг, уцелевших в годы войны и возвращённых обратно вернувшимися иезуитами. По данным И. Пашенды, Г. Энгел преподавал в 1698–1699 гг. архитектуру в Полоцком иезуитском коллегиуме [12, с. 353]. Им была взята сама идея оригинального плана здания. Троицкий костёл в Слуцке им построен в начале XVIII в. (1713–1714 гг.), но в отличие от полоцкого, остатки которого нами найдены в 2009 г., пространство его наугольных башенок было частью интерьера. В частности, Пашендой были обнаружены в Святой Липке эскизы, говорящие о создании центрально купольного костёла на основе шестиугольной формы, в котором Григорий Энгел пять лет был суперитором до своей смерти в 1722 г. В архиве Чарторыйских сохранились планы этого храма со следами многочисленных исправлений и доработок архитектора. Исследователь отмечает, что данный храм был деревянным, с пятью башенками, с крестами и одним алтарём (апсидой?) [12, с. 342–344; 358–360, 363–365] (рисунок 1: 3).

После событий русско-польской (1654–1667 гг.) и Северной войны (1700–1721 гг.) именно иезуиты первыми возобновили кирпичное строительство, о чём говорит возведение ими на основе остатков бывшей сакристии кирпичной библиотеки.



1. – костёл св. Петра и Павла на Верхнем замке в Полоцке (прорисовка с плана 1786 г.); 2. – костёл св. Казимира (?), построен В. Будаком (?), вторая четверть XVII в. в Полоцком иезуитском коллегиуме, реконструкция кирпичной центральной части на основе шурфов (пунктиром отмечены предполагаемые очертания деревянного алтаря и притвора); 3 – костёл св. Духа в Слуцке, построенный Г. Энгелом в 1713–1714 гг. (И. Пашенда)

Рисунок 1. – Центрально купольные костёлы

Отправной точкой роста влияния ордена на архитектуру Полоцка стало начало возведения аптечной лаборатории с 1717 по 1720 гг., костёла (с 1735 г.) и нынешнего коллегиума (с 1747 г.), где местные мастера осваивали новейшие архитектурно-планировочные, конструктивные решения и строительные технологии [1, с. 274, 279]. Огромная стройка потребовала от иезуитов организации работы и обеспечения жизни сотен человек. Среди них кроме братьев были как городские мастера и их «хлопцы», выполнявшие ряд важных работ, так и десятки зависимых крестьян из орденских имений или присланных в помощь от шляхты и городского нобилитета для некавалифицированного труда. Таким образом, благодаря масштабу и длительности проводимых орденом строительных работ Полоцкий иезуитский коллегиум с XVIII в. фактически стал «градообразующим предприятием» Полоцка, дававшим огромное количество рабочих мест для его жителей [7, с. 246–248].

Начавшееся масштабное и непрерывное строительство иезуитского коллегиума привело к тому, что местные мастера смогли осваивать как типовые, так и новейшие наработки в области конструктивных, планировочных архитектурных и стилистических решений, используемые в Европе и Речи Посполитой в XVIII в. при возведении больших и малых капитальных объектов. В дальнейшем этот опыт в различной степени был использован

полоцкими архитекторами и строителями при возведении построек других католических орденов, православных и униатских монастырей, общественных и частных зданий города. Таким образом, на многие десятилетия иезуитский коллегиум стал «первопроходцем» и проводником как типовых, так и самых новейших европейских наработок XVIII в., которые потом внедрялись в архитектуру и материальную культуру Полоцка.

При возведении костёла и корпусов коллегиума иезуиты применили ряд довольно простых, но выразительных элементов декоративного убранства фасадов, характерных для стиля барокко, плоские пилястры, массивные наличники окон с замковыми камнями. Будучи главной архитектурной доминантой Полоцка, комплекс иезуитского коллегиума фактически предопределил архитектурный облик и конструктивно-планировочные решения для каменных зданий этого города, возводимых в последней четверти XVIII – первой половине XIX вв. [10, с. 380–390]. Фактически иезуиты первыми принесли барочную традицию в архитектуру и строительство Полоцка.

Первыми иезуитские наработки использовали различные католические ордена при возведении своих каменных построек в Полоцке. Не обошли вниманием иезуитские достижения в монументальном строительстве и работавшие в Полоцке архитекторы И. Зигфриден, И. Старов, которые создали архитектурный ансамбль главной площади города, возвели ряд казённых зданий в различных его частях. Дань иезуитским наработкам в области убранства фасадов каменных зданий Полоцка отдавал и итальянский архитектор Д. Кваренги, которому Российская императрица поручила спроектировать административно-жилой корпус с домовою церковью св. Екатерины для православного Богоявленского монастыря. В отличие от прежних архитекторов, работавших ещё в стиле барокко, Кваренги был одним из главных проводников строгого классицизма, активно внедрявшегося Екатериной II по всей Российской империи. Строя монастырский корпус, новый архитектор акцентировал помещение домовою церкви классическим портиком и куполом. Но чтобы стилистически увязать возводимое сооружение с недавно возведёнными зданиями в стиле позднего барокко (корпус францисканского монастыря, флигель служб для дома генерал-губернатора), украсил окна и стены массивными наличниками и рустами [10, с. 386–387; 13, с. 6–8].

Наиболее показательным в этом плане восстановление Софийского собора (с 1738 г.) и возведение униатами базилианского монастыря при нём (с 1752 г.). Они взяли за основу ряд архитектурных, конструктивных и планировочных решений иезуитов для своих главных зданий. При сравнении планов комплексов хорошо заметно наличие двух замкнутых дворов и сходное размещение корпусов (рисунок 2). Главные здания базилианского монастыря (с 1752 г.) по очертаниям и характеру взаимосвязи напоминают постройки иезуитского ансамбля. Н-образный трёхэтажный корпус соответствует «новому» коллегиуму, небольшой корпус между его крыльями, соединённый с ним оградами, повторяет корпус «старого» коллегиума, Г-образная хозяйственная постройка на северо-запад от главных корпусов соответствует комплексу иезуитских мануфактур (строилась с 1760 по 1772 г.). По сравнению с иезуитскими зданиями, многие передовые конструктивные решения униаты применяли ограниченно. Несмотря на отсутствие подвалов, в корпусах имелись сводчатые дренажи и водоспуски из кирпича. Их кладка на нижнем этаже продольно-поперечная, а не в «ёлку» [14, с. 91–95]. Было и обратное влияние: по предположению Иежи Пашенды Ян Кристоф Глаубиц, восстанавливая Софийский собор, ремонтировал и обгоревший купол костёла св. Стефана у иезуитов в 1751–1752 гг., повторив его потом в более изысканной форме на костеле св. Казимира в Вильне [1, с. 285].

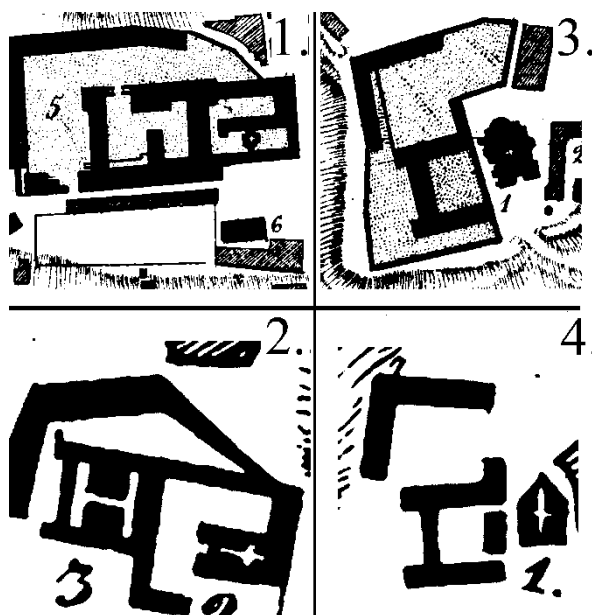


Рисунок 2. – Контуры иезуитского коллегиума (кадетского корпуса) на планах Полоцка и базилианского монастыря. Вверху на плане 1778 г. (1. – коллегиум; 3. – монастырь). Внизу на плане 1838 г. (2. – кадетский корпус; 4. – монастырь)

Комплекс бернардинского монастыря начали строить из кирпича с 1758 по 1769 гг. Он имеет сходные, но более упрощённые и архаичные конструктивные и планировочные решения келий и коридоров [15, с. 453; 16, с. 33–35]. В частности, большинство келий разделяли двухарочные несущие стены (рисунок 3). Конструкция большинства сводов помещений была, как и в иезуитских зданиях, цилиндрической с распалубками, но их кладка в основном являлась продольно-поперечной, а не в «ёлку» как в коллегииуме. Металлические связи применялись редко, даже когда толщина стен не была значительной, что привело к образованию продольных трещин в коридорных сводах. Ряд сходных с коллегииумом черт имела трапезная – вход в неё был в центре торцевой стены между двух расположенных симметрично ниш. Она тоже не имела столбов. Но очертания дуги её свода были приближены к полуциркульной форме, он имел всего четыре распалубки и низко опущенные пяты. В кладке стен корпуса на уровне фронтона на восточной стене выявлена кладка лекального кирпича (подобные экземпляры использованы в коллегииуме) во вторичном применении. Расположение лестницы на центральной оси большего крыла здания сходно с размещением главного входа и лестницы в иезуитском коллегииуме на поперечной оси главного крыла главного здания комплекса. Обследование её неоштукатуренных участков кладки на уровне чердака выявило полную аналогию приёмов выкладки ступенек и перевязки сводов со стенами. Это говорит как о широком применении данных строительных приёмов в XVIII в., так и о возможном участии в возведении бернардинского монастыря ряда мастеров и рабочих, принимавших ранее участие в иезуитском строительстве. Для архитектурного убранства фасадов костёла, главного корпуса и пекарни изучаемого ансамбля использован ряд архитектурных элементов коллегииума: пилястры с профильными базами и капителями, массивные наличники окон с замковыми камнями, только в уменьшенном виде [17, с. 21].



1. – в коллегииуме (корпус «А»); 2. – в бернардинском монастыре

Рисунок 3. – Двухарочные поперечные стены между бывшими кельями

Иезуитские архитектурно-строительные наработки в стиле барокко оказали определённое влияние и на православное строительство. Это прежде всего относилось к архитектурному ансамблю Богоявленского монастыря – единственного оплота православия в Полоцке в XVII–XVIII вв. Строительство кирпичного православного храма Богоявленского монастыря, начатое в 1761 г. на месте сгоревшей деревянной церкви, было прервано через год очередным пожаром в Полоцке и отсутствием средств и материалов. По данным И.П. Дейниса, к этому времени стены были возведены наполовину [18, с. 95]. И только в 1777 г. полностью возведённый собор был освящён [15, с. 455; 18, с. 95]. Здание Богоявленского собора в плане представляет собой одноапсидное крестово-купольное решение с двухбашенным главным фасадом, ориентированным на запад. В центральной части средокрестия, являющегося главным композиционным центром, возвышается восьмигранный световой барабан, увенчанный большим куполом сферической формы. В верхней части купола на его вертикальной оси установлена шестигранная башенка, украшенная небольшим куполом сложной формы, с «яблоком» и православным крестом, завершающим вертикальную композицию.

Двухбашенный западный фасад Богоявленского собора как элемент лаконичной пространственной композиции барочного стиля широко применяется в строительстве как католических, так и православных храмов периода XVII–XVIII веков. Следует отметить, что за прошедшие почти 250 лет с момента возведения Богоявленского собора, он претерпел неоднократные разрушения и восстановления, после которых фактически неизменным остался только его остов: стены, своды и купол, выложенные из кирпича. Судя по найденным документам, фотографиям и обмерным чертежам, дошедшим до нас, изменениям подверглись покрытия куполов и крыши, фронтоны, обрамления, количество и форма оконных проёмов, форма надкупольных башенок и даже количество ярусов на главной вертикальной оси.

В настоящий период времени можно сказать, что декоративные элементы фасадов храма отличаются строгостью и лаконичностью и формируют его облик как православного храма в стиле классицизма с элементами барокко. Так, вертикальные пилястры, расположенные по краям и в углах стен, придают фасадам ритм и стройность. В нижней части пилястр узким плинтом выделен их пьедестал, в верхней – узкий профилированный поясок имитирует капители. По всему периметру собора в верхней части стены профилированный карниз опоясывает фасады здания. На северном и южном фасадах форма арочных окон подчеркнута тонкой профилировкой из штукатурного слоя. Окно над порталом и ниши западного фасада обрамлены рельефными наличниками и подчеркнуты бровками. Пилястры также обрамляют рёбра главного светового барабана и обеих башен четвериков.

Следует отметить, что согласно обмерным чертежам Богоявленского собора 1976 года, на центральный купол, выложенный из кирпича в виде полусферы диаметром около 11 м, в верхней части установлена шестигранная кирпичная световая башенка – фонарь, высотой около 3 м, увенчанный куполом шатровой формы, диаметром около 2,5 м. То есть в обмерных чертежах зафиксирована мощная двухъярусная композиционная вертикаль с крестом, высотой от основания главного купола около 12 м. Учитывая, что высота восьмигранного светового барабана от конька кровли около 6 м, а высота храма от уровня земли до конька кровли почти 19 м, то общая высота храма с крестом составляет 36,55 м. Таким образом, Богоявленский собор, находившийся на нижней террасе поймы реки Западной Двины, благодаря такому мощному, не лишённому стройности композиционному решению всего объёма воспринимается на фоне реки торжественно-величавым храмом² (рисунок 4).

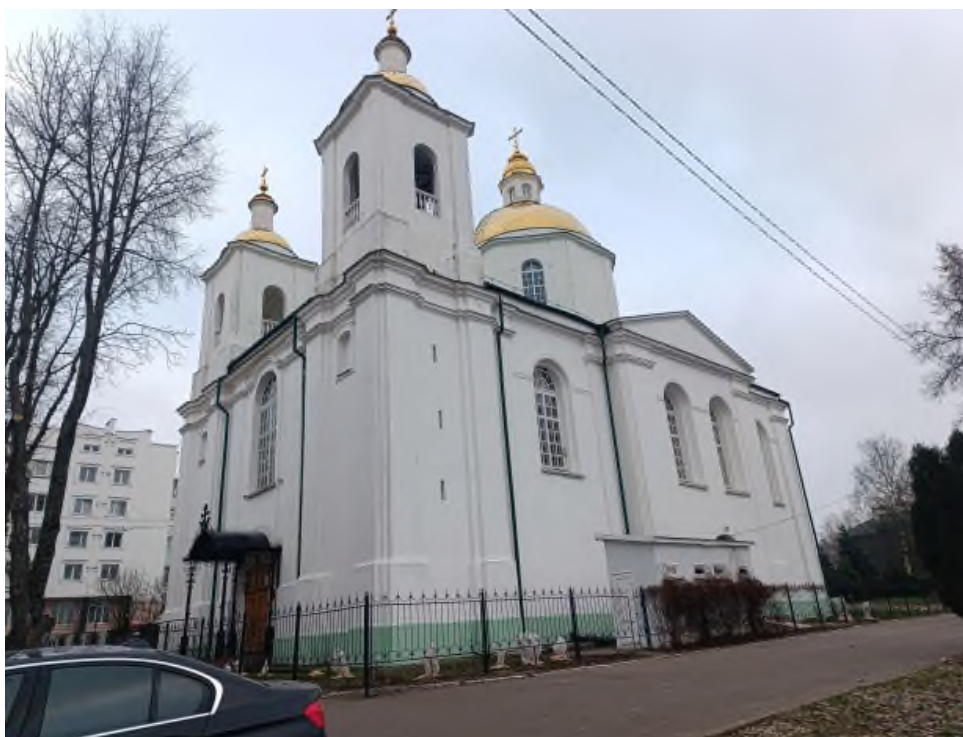


Рисунок 4. – Богоявленский собор в Полоцке

Если провести сравнение Свято-Николаевского собора, построенного в период первой трети XVIII в. как католическая церковь Св. Стефана, с Богоявленским собором, возведённым в период второй трети того же века, но изначально как православной церкви, можно увидеть ряд совпадений как в архитектурно-композиционном решении, так и в конструктивных особенностях.

Оба собора решены по принципу крестовокупольной системы с двумя башнями на главном фасаде. В обоих храмах кладка сводов и куполов осуществлялась из кирпича местного производства в «ёлку» с гуртом. И в декоративно-пластическом решении внутреннего подкупольного пространства барабана обоих храмов тоже много общего [1, с. 275–276, 284]. Так, сдвоенные колонны Свято-Никольского собора заменены на сдвоенные пилястры в Богоявленском соборе, вогнутые ниши – на плоские с фресками. Сходство по профилировке карнизов и очертаниям планов прослеживается и в опорных подкупольных столбах обоих храмов, но в Свято-Николаевском соборе барочные украшения колонн и карнизов более сложные и детальнее проработаны. Данный анализ показывает, что в период XVII–XVIII веков архитектурно-планировочные решения храмов различных христианских конфессий строились на общих стилевых принципах барокко и классицизма (рисунок 5).

² Богоявленская церковь в г. Полоцке (рабочий проект реставрации), автор В. Слюнченко, лист. АС – 2, Минск, 1976 г.



1. – у Николаевского собора (костёл св. Стефана); 2. – у Богоявленского собора
Рисунок 5. – Интерьер подкупольного пространства и убранство барабана

В этот же период, в 1790 (или 1750?) г. на берегу озера Ропно, на подворье, принадлежавшем полоцкому Богоявленскому монастырю, в барочном стиле строится церковь Святого Николая Чудотворца. Возведённая из кирпича, церковь имеет крестообразный план, характерный для православных храмов XVIII века [25, с. 14–22]. Аналогично Богоявленскому собору на сегодняшний период времени церковь Святого Николая Чудотворца имеет восьмиугольный деревянный световой барабан с куполом из деревянных конструкций. Внешняя форма церкви представлена в виде относительно простого компактного решения с минимумом фасадного декора (рисунок 6).

За столь долгий период существования церковь претерпела ряд катаклизмов, пожаров и перестроек, в результате которых историческую достоверность сохранили только конструкции и элементы (и то не все), выложенные из кирпича. Расположенные по углам стен плоские пилястры и достаточно массивные обрамления оконных и дверных арочных проёмов с замковыми камнями идентичны архитектурной пластике стен Богоявленского храма братского монастыря и стен Полоцкого иезуитского коллегиума. Её оштукатуренные стены окрашены в белый цвет. Большой купол, расположенный над центром крестообразного плана, создаёт вертикальность здания, зрительно делает его более лёгким и гармоничным в природной среде. Крестообразный план подчеркнут четырьмя треугольными фронтонами [25, с. 18]. В отличие от Богоявленского собора главный западный фасад Свято-Никольской церкви решён более скромно: над входом в церковь возвышается квадратная в плане деревянная башня с четырёхскатной кровлей, увенчанная небольшим куполом с крестом. Церковь Святого Николая Чудотворца, построенная в сельской местности, по своему архитектурному решению является редким примером сочетания позднебарочного стиля с элементами классицизма (см. рисунок 6).

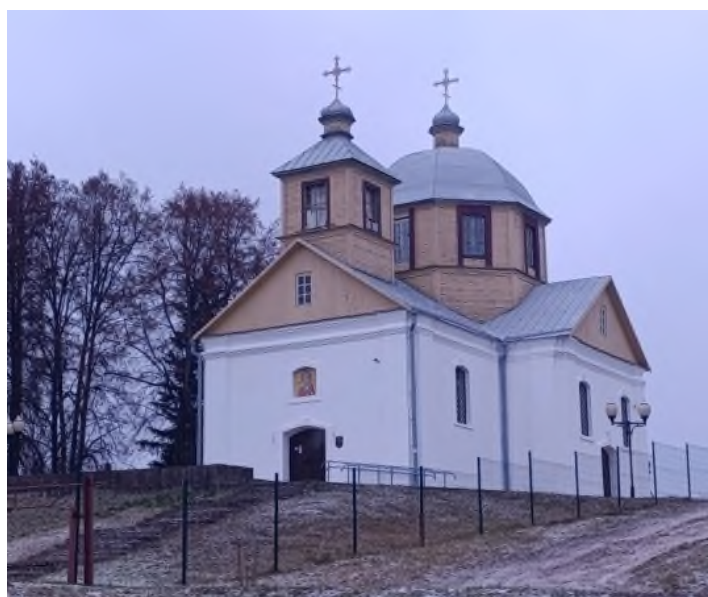


Рисунок 6. – Церковь св. Николая Чудотворца на оз. Ропно

Начавшееся в Полоцке гражданское и казённое строительство также не обошлось без влияния архитекторов и мастеров, подготовленных в коллегииуме иезуитов.

Наиболее ранним из сохранившихся сегодня объектов образцом, созданным в рамках новой строительной программы, является здание почтамта, построенное российским архитектором, представителем раннего классицизма И. Старовым к 1773 г. на ул. Евфросиньи Полоцкой (ранее Рижской или Санкт-Петербургской) недалеко от бывшей рыночной площади [6, с. 34; 19, с. 286].

Здание выполнено в классическом стиле. Первоначально ему были присущи строгость композиции, симметричность, отсутствие барочного декора. Оконные и дверные проёмы прямоугольной формы с выступающими наличниками, перемычки клинчатые. Межоконные простенки и глухие участки стен выполнены в технике «французских», т.е. ленточных, рустов (без вертикальных швов) (рисунок 7). Решение оконных проёмов и пластики наружных стен перекликается с архитектурным решением здания «старого коллегииума», построенного иезуитами в стиле позднего европейского барокко. Здание почтамта символизирует новый этап в развитии и преемственности городской архитектуры Полоцка.



Рисунок 7. – Здание почтамта по ул. Евфросиньи Полоцкой (ранее Рижской или Санкт-Петербургской), построенное архитектором И. Старовым

Последние здания коллегииума – бурса и богадельня, построенные между 1788 и 1793 гг., возможно, испытали на себе обратное воздействие. Они уже возводились под влиянием архитектуры существующих казённых зданий на площади (в архитектурном облике бурсы и богадельни имеется ряд сходств с боковыми флигелями, построенными И. Старовым и И. Зигфриденем) [20, с. 162, 163; рисунок 7: 1]. Отличительными особенностями построек И. Зигфридена было наличие массивных межэтажных карнизов и богато рустованных фасадов. В начале 90-х гг. XVIII в., принимая деятельное участие в перепланировке главной площади Полоцка, иезуиты возводят здание казённой аптеки, которое пристраивается к корпусу с театром. Данная постройка должна была завершить оформление юго-западного угла площади, где между коллегииумом и губернским магистратом имелся большой разрыв, который требовалось заполнить. Новое здание было сделано двухэтажным и рисунком своих фасадов увязывалось как с корпусами коллегииума (дом ксендзов пенсионеров), так и с застройкой площади. Поэтому оно имело массивный карниз между этажами, характерный для зданий И. Зигфридена, а также массивные обрамления окон, характерные для всех зданий площади. Пилястры были поэтажными, чтобы объединить их как с коллегииумом, так и с общественными зданиями [10, с. 386; рисунок 4.4.24].

Влияние иезуитской архитектуры проявилось на частном и общественном строительстве даже во второй трети XIX в. В 2007 г. были выявлены остатки дома, построенного в первые десятилетия XIX в., его подвал имел тонкие наружные продольные стены толщиной в кирпич и цилиндрический свод, выполненный в «ёлку» в пол кирпича. По всей видимости, это была чья-то неудачная попытка повторить данную систему кладки, увиденную у иезуитов, поскольку тонкие стены дома не выдержали распора свода. Несмотря на попытку подпереть его подпружной аркой, он обвалился. Фрагмент его кладки обнаружен на полу подвала постройки³. Кладки сводов и дренажные бойницы, созданные по образцам иезуитских построек, также воспроизводили строители зданий будущей крупнейшей гостиницы дореволюционного Полоцка – «Гранд-Отеля» [21, с. 58].

³ Соловьёв А.А. Отчёт об археологическом надзоре за ремонтом теплотрассы по ул. Войкова, 1–5 в г. Полоцке в 2007 г. – Д. № 2510. – См. с. 11–12, 37: фото 12, 37: фото 13, 73: рисунок 6, 76: рисунок 8, 77: рисунок 9.

Масштабное строительство иезуитов и других орденов требовали подготовки квалифицированных специалистов различных уровней. Поэтому в полоцком коллегииуме к последней четверти XVIII в. архитектуру преподавали уже на уровне факультета [22, с. 5]. Уровень преподавания архитектуры в коллегииуме позволил уже к началу строительства нынешнего ансамбля подготовить ряд талантливых и преданных ордену специалистов, к примеру, таких, как Габриель Ленкевич и Франциск Каре. Большой вклад в преподавание архитектуры и возведение ансамбля внесли и приезжие иезуиты – префект строительства храма Казимир Мателеяковский, каменщик Бенедикт Мезер и столяр Антоний Лазурович, который укладывал черепицу на иезуитской школе в 1749 г. [1, с. 274, 279, 280; 6, с. 21, 30, 32, 33, 44, 57, 58].

В последней четверти XVIII в. влияние иезуитов на жизнь и культуру Полоцка усилилось в связи с его регулярной перепланировкой и строительством монастырей из кирпича различными католическими орденами. Одновременно с коллегииумом строился новый бернардинский монастырь за Двиной, восстанавливался Софийский собор и Троицкий монастырь при нём, возводился новый храм православного Богоявленского монастыря. После присоединения правобережной части Полоцка к России возводятся казённые здания для администрации и военных ведомств. Сложившийся к моменту регулярной перепланировки Полоцка ансамбль коллегииума во многом определил характер и масштаб застройки главной городской площади, а также наложил огромный отпечаток на процесс формирования уличной сети в центральной части города [10, с. 386: рисунки 4.4.22–4.4.24]. Вместе с этим царское правительство избегало поручать культовое и гражданское строительство архитекторам-иезуитам по идеологическим соображениям, как, например, это произошло при попытке возведения каменной соборной Покровской церкви в Полоцке. Таким образом, влияние иезуитского коллегииума на развитие архитектуры и строительных технологий после присоединения Полоцка к Российской империи осуществлялось прежде всего через специалистов, учившихся у иезуитов и работавших на строительных объектах (при этом сами иезуитами они не являлись и подозрения или недоверия со стороны новых заказчиков не вызывали) [23, с. 38]. Следы этого влияния прослеживаются даже в зданиях Полоцка, построенных в 60–70-х гг. XIX в., что видно на примере конструкций подвала бывшей гостиницы «Гранд-Отель» (проспект Ф. Скорины, 3).

При проектировании фасадов общественных зданий для создания ансамбля застройки главной площади Полоцка архитектор Иван Зигфриден отправной точкой сделал иезуитский коллегииум. Он брал за основу элементы убранства корпусов архитектурного комплекса, построенного иезуитами, и исходил из особенностей его планировки. Таким образом, И. Зигфриденом на основе пропорций различных элементов костёла и корпусов иезуитского коллегииума был создан позднебарочный ансамбль застройки центра Полоцка [10, с. 386: рисунки 4.4.22–4.4.24, 386: рисунок 4.4.27]. Данный вопрос подробно был рассмотрен Ю.В. Чантурией [10, с. 380–387].

Полоцкий иезуитский коллегииум также был крупным научным центром. В его мастерских, особенно после строительства мануфактур в 1765–1786 гг., создаются уникальные научные приборы и механизмы, по качеству, художеству и точности не уступающие европейским аналогам.

Заключение. Начиная с 30-х гг. XVII в. влияние Полоцкого иезуитского коллегииума на материальную культуру, архитектуру и градостроительную ситуацию в Полоцке становится всё более значительным.

Первоначально это проявилось в изготовлении изразцов и плиток пола в барочном оформлении. Именно иезуитами налаживается массовый выпуск в XVIII в. изразцов и черепицы. Пластины изразцов оформляются в соответствии с «гданьской» модой, по ней же строятся печи в коллегииуме. Оттуда их новые конструкции получают распространение в домах горожан. Ещё одним фактором влияния иезуитов на материальную культуру Полоцка стало наличие в коллегииуме своей гуты, которая позволяла делать продукцию и для продажи.

Иезуиты налаживают производство кирпича и качественного связующего раствора. Начинается кирпичное строительство на территории коллегииума. В Полоцке создаются первые «цегельни», и в 40-х гг. XVII в. появляются первые здания на кирпичных подвалах и фундаментах. После русско-польской войны 1654–1667 гг. именно иезуиты первыми возобновили капитальное строительство.

Начинается расширение территории коллегииума, который с 30-х гг. XVIII в. стал главной архитектурной и градостроительной доминантой в Полоцке. После возведения существующего ансамбля он стал отправной точкой для регулярной перепланировки и архитектурно-стилистического решения центральной части города архитектором И. Зигфриденом.

Сами корпуса коллегииума стали для архитекторов, мастеров и строителей Полоцка огромной энциклопедией, где на сравнительно небольшой территории были собраны как типовые, так и оригинальные конструктивные, планировочные и стилистические наработки европейской архитектуры XVIII в., фактически ансамбль стал витриной этих достижений. Оттуда они переносились и использовались при возведении других объектов Полоцка, монастырских комплексов, общественных и частных зданий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Paszenda J. Zabudowania jezuickie w Polocku // Paszenda J. Budowle jezuickie w Polsce XVI–XVIII w. – Kraków, 2010. – Т. 5. – С. 269–298.
2. Соловьев А.А. Усадебный комплекс «Домик Петра I в городе Полоцке»: История. Владельцы. Легенды. – Полоцк: Полоц. кн. изд-во, 2015. – 123 с.

3. Лявшук В.Е. Иезуиты в Гродно в 1622–1700 гг. – Kraków: Akademia Ignatianum, Wydawnictwo WAM, 2013. – 328 с.
4. Соловьёв А.А. Архитектура Полоцкого иезуитского коллегия в конце XVI–XVIII вв.: культурные контакты и внешние влияния (на примере печных изразцов и строительных технологий) // *Вестник МДУ імя А.А. Куляшова. Серыя А. Гуманітарныя навукі (гісторыя, філасофія, філалогія)*. – 2018. – № 1(51). – С. 86–98.
5. Соловьёв А.А. Изразцы и печи полоцкого коллегия (конец XVI – первая треть XIX в.): архитектурно-археологический очерк. – Полоцк: Полоц. кн. изд-во, 2013. – 95 с.
6. Соловьёв А.А. Полоцкий иезуитский коллегия в ретроспективе (1581–1914): архитектурно-археологический очерк. – Полоцк: Полоц. кн. изд-во, 2012. – 97 с.
7. Kadulska I. Akademi Polocka u progu działałności // *Гісторыя і археалогія Полацка і Полацкай зямлі: матэрыялы V міжнароднай навуковай канферэнцыі (24–25 кастрычніка 2007 г.)* / Уклад. Т.А. Джумантаева. – Полацк: НППКМЗ, 2009. – С. 245–251.
8. Здановіч Н.І. Кафлярства ў Беларусі (на матэрыяле калекцыі полацкай кафлі): метадычны дапаможнік. – Мінск: БДПУ, 2005. – 99 с.
9. Соловьёв А.А. Исследования дома № 19 по улице Нижне-Покровской // *Матэрыялы навукова-практычнай канферэнцыі: (па выніках навукова джаследчай работы супрацоўнікаў Нацыянальнага Полацкага гісторыка культурнага музея-запаведніка ў 2015 г.)* / Уклад. Т.У. Явіч. – Мінск: Медысон, 2018. – С. 144–157.
10. Чантурия Ю.В. Белорусское градостроительное искусство: средневековое наследие, ренессанс, барокко, классицизм в контексте европейского зодчества. – Минск: Бел. наука, 2017. – 503 с.
11. Полоцкое Радование: Свято-Евфросиниевские Торжества 1910 года / Под ред. А.Г. Борисовой-Горюновой. – Полоцк: Свято-Евфросиниевский женский монастырь в г. Полоцке Полоцкой епархии Белорусской Православной Церкви, 2010. – 437 с.
12. Paszenda J. Kościół jezuitów w Sucku // *Paszenda J. Budowle jeziuckie w Polsce XVI–XVIII w.* – Kraków, 2000. – Т. 2. – С. 339–366.
13. Морозов В.Ф. Роль Екатерины II в формировании стилистики архитектуры Беларуси конца XVIII века // *Актуальные проблемы архитектуры Белорусского Подвинья и сопредельных регионов: сб. науч. работ Междунар. науч.-практ. конф. К 50-летию Полоц. гос. ун-та, Новополоцк, 18–19 окт. 2018 г.* / Полоц. гос. ун-т; под общ. ред. В.Е. Овсейчика (отв. ред.), Г.И. Захаркиной, Р.М. Платоновой. – Новополоцк: ПГУ, 2018. – С. 3–11.
14. Соловьёв А.А. Полоцкий Софийский базилианский монастырь с XVIII до начала XX вв. (архитектура планировка конструкции) // *Актуальные проблемы архитектуры Белорусского Подвинья и сопредельных регионов: сб. ст. респ. науч.-практ. семинара, Новополоцк, 8–9 окт. 2015 г.* / Полоц. гос. ун-т; под общ. ред. В.Е. Овсейчика (отв. ред.), Г.И. Захаркиной, Р.М. Платоновой. – Новополоцк: ПГУ, 2015. – С. 90–100.
15. Габрусь Т.В. Архитектурные ансамбли Полоцка эпохи барокко // *Полоцк: Полоцк и полоцкое княжество (земля) в IX–XIII вв., летопись древних слоёв, Полоцк и его округа XIV–XVIII вв., ремесло, денежное обращение и торговые связи Полоцка в средневековье (по данным археологии, нумизматики и письменным источникам), культура и просвещение в средневековом Полоцке* / О.Н. Левко Г.В. Штыхов, Т.В. Габрусь и др.; редкол.: А.А. Коваленя (гл. ред.), О.Н. Левко (зам. гл. ред.), Э.М. Загоруйский и др.; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т истории. – Минск: Бел. наука, 2012. – 743 с. – (древнейшие города Беларуси). – С. 444–456.
16. Соловьёв А.А. Полоцкий бернардинский монастырь: натурные обследования этажей и чердака келейного корпуса // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки*. – 2021. – № 16. – С. 29–39.
17. Соловьёв А.А. Здание пекарни бернардинского монастыря: натурное обследование // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки*. – 2012. – № 16. – С. 19–22.
18. Дэйніс І.П. Полацкая даўніна. – Мінск: Медисонт, 2007. – 328 с.
19. *Архітэктура Беларусі: нарысы эвалюцыі ва ўсходнеславянскім і еўрапейскім кантэксце: у 4 т.* / рэдкал.: А.І. Лакотка і інш. – Мінск: Бел. наука, 2007. – Т. 3: Другая палова XVIII – першая палова XIX ст. – 502 с.
20. Соловьёв А.А. Итоги архитектурно-археологического изучения бывшей иезуитской бурсы // *Беларускае Падзвінне: вопыт метадыка і вынікі палявых і міждысцыплінарных даследаванняў: зб. навук. арт. III міжнар. навук. канф., Полацк, 14–15 крас. 2016 г.: у 2 ч.* / Полацкі дзярж. ун-т; пад агул. рэд. Д.У. Дука, У.А. Лобача, А.І. Корсак. – Наваполацк: ПДУ, 2016. – Ч. 1. – С. 155–166.
21. Соловьёв А.А. Итоги натурных исследований стен и подполья первого этажа дома по проспекту Ф. Скорины, 5 // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки*. – 2023. – № 3. – С. 55–68.
22. Захаркина Г.И., Лукьяненко В.Г., Соловьёв А.А. Путь от коллегия до университета // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки*. – 2012. – № 16. – С. 2–6.
23. Гліннік В., Пярвышын У. Нереалізаваны праэкт полацкага землямера // *Мастацтва*. – 1999. – № 1. – С. 37–39.
24. Соловьёв А.А. Стекло и гута Полоцкого иезуитского коллегия конца XVI – начала XIX вв. // *Беларускае Падзвінне: вопыт, метадыка і вынікі палявых і міждысцыплінарных даследаванняў: зб. навук. арт. II міжнар. навук. канф., Полацк, 17–18 красав. 2014 г.: у 2 ч.* / Полацкі дзярж. ун-т; пад агул. рэд. Д.У. Дука, У.А. Лобача, С.А. Шыдлоўскага. – Наваполацк: ПДУ, 2014. – Ч. 1. – С. 89–102.
25. Соловьёв А.А. Храм Св. Николая в с. Ропно (с. Коллективное): архитектурно-исторический анализ // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия А, Гуманитарные науки*. – 2026. – № 1. – С. 14–22.

REFERENCES

1. Paszenda, J. (2010). *Zabudowania jeziuckie w Polocku. Paszenda J. Budowle jeziuckie w Polsce XVI–XVIII w., T. 5, 269–298.* (In Polish).
2. Solov'ev, A.A. (2015). *Usadebnyi kompleks "Domik Petra I v gorode Polotske": Istoriya. Vladel'tsy. Legendy.* Polotsk: Polotsk. kn. izd-vo. (In Russ.).
3. Lyavshuk, V.E. (2013). *Iezuity v Grodno v 1622–1700 gg.* Kraków: Akademia Ignatianum, Wydawnictwo WAM. (In Polish).

4. Solov'ev, A.A. (2018). Arkhitektura Polotskogo iezuitskogo kollegiuma v kontse XVI–XVIII vv.: kul'turnye kontakty i vneshnie vliyaniya (na primere pechnykh izraztsov i stroitel'nykh tekhnologii). *Vestnik MDU imya A.A. Kulyashova. Seriya A. Gumanitarnyya nauki (gistoryya, filasofiya, filalogiya)*, 1(51), 86–98. (In Russ.).
5. Solov'ev A.A. (2013). *Izraztsy i pechi polotskogo kollegiuma (konets XVI – pervaya tret' XIX v.): arkhitekturno-arkheologicheskii ocherk*. Polotsk: Polots. kn. izd-vo. (In Russ.).
6. Solov'ev, A.A. (2012). *Polotskii iezuitskii kollegium v retrospektive (1581–1914): arkhitekturno-arkheologicheskii ocherk*. Polotsk: Polots. kn. izd-vo. (In Russ.).
7. Kadul'ska, I. (2009). Akademi Polocka u progno dzial'ności. In T.A. Dzhumantaeva (Eds.) *Gistoryya i arkheologiya Polatska i Polatskai zyamli: materyyaly V mizhnarodnai navukovoi kanferentsyi (24–25 kastychnika 2007 g.)* (245–251). Polatsk: NPGKMZ (In Polish).
8. Zdanovich, N.I. (2005). *Kaflyarstva u Belarusi (na materyyale kalektsyi polatskai kafli): metadychny dapamozhnik*. Minsk: BDPU. (In Belarus.).
9. Solov'ev, A.A. (2018). Issledovaniya doma № 19 po ulitse Nizhne-Pokrovskoi. In T.U. Yavich (Eds.) *Materyyaly navukova-praktychnai kanferentsyi: (pa vynikakh navukova dzhasledchai raboty supratsounikay Natsyyanal'naga Polatskaga gistoryka kul'turnagamuzeya-zapavednika u 2015 g.)* (144–157). Minsk: Medysont. (In Russ.).
10. Chanturiya, Yu.V. (2017). *Belorusskoe gradostroitel'noe iskusstvo: srednevekovoe nasledie, renessans, barokko, klassitsizm v kontekste evropeiskogo zodchestva*. Minsk: Bel. navuka. (In Russ.).
11. Borisova-Goryunova, A.G. (Eds.). (2010). *Polotskoe Radovanie: Svyato-Evfrosinievskie Torzhества 1910 goda*. Polotsk: Svyato-Evfrosinievskii zhenskii monastyr' v g. Polotske Polotskoi eparkhii Belorusskoi Pravoslavnoi Tserkvi. (In Russ.).
12. Paszenda, J. (2000). Kościół jezuitów w Sucku. *Paszenda J. Budowle jezuickie w Polsce XVI–XVIII w., T. 2*, 339–366. (In Polish).
13. Morozov, V.F. (2018). Rol' Ekateriny II v formirovani stilstiki arkhitektury Belarusi kontsa XVIII veka. In V.E. Ovseichik (Eds.), G.I. Zakharkina (Eds.), R.M. Platonova (Eds.) *Aktual'nye problemy arkhitektury Belorusskogo Podvin'ya i sopredel'nykh regionov: sb. nauch. rabot Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. K 50-letiyu Polots. gos. un-ta, Novopolotsk, 18–19 okt. 2018 g.* (3–11). Novopolotsk: PGU. (In Russ.).
14. Solov'ev, A.A. (2015). Polotskii Sofiiskii bazilianskii monastyr' s XVIII do nachala XX vv. (arkhitektura planirovka konstruktssii). In V.E. Ovseichik (Eds.), G.I. Zakharkina (Eds.), R.M. Platonova (Eds.) *Aktual'nye problemy arkhitektury Belorusskogo Podvin'ya i sopredel'nykh regionov: sb. st. resp. nauch.-prakt. seminar, Novopolotsk, 8–9 okt. 2015 g.* (90–100). Novopolotsk: PGU. (In Russ.).
15. Gabrus', T.V. (2012). Arkhitekturnye ansambli Polotska epokhi barokko. In *Polotsk i polotskoe knyazhestvo (zemlya) v IX–XIII vv., letopis' drevnikh sloev, Polotsk i ego okruga XIV–XVIII vv., remeslo, denezhnoe obrashchenie i torgovye svyazi Polotska v srednevekov'e (po dannym arkheologii, numizmatiki i pis'mennym istochnikov), kul'tura i prosveshchenie v srednevekovom Polotske* / O.N. Levko G.V. Shtykhov, T.V. Gabrus' i dr.; redkol.: A.A. Kovalenya (gl. red.), O.N. Levko (zam. gl. red.), E.M. Zagorul'skii i dr.; Nats. akad. nauk Belarusi, In-t istorii. – Minsk: Bel. navuka, 2012. – 743 s. – (drevneishie goroda Belarusi). – S. 444–456. (In Russ.).
16. Solov'ev, A.A. (2021). Polotskii bernardinskii monastyr': naturnye obsledovaniya etazhei i cherdaka keleinogo korpusa [The cellars of the main building of bernardine monastery in Polotsk: full-scale investigation]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil Engineering. Applied Sciences]*, 16, 29–39. (In Russ., abstr. in Engl.).
17. Solov'ev, A.A. (2012). Zdanie pekarni bernardinskogo monastyra: naturnoe obsledovanie [The cistercian monastery bakehouse: full-sized inspection]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil Engineering. Applied Sciences]*, (16), 19–22. (In Russ., abstr. in Engl.).
18. Deinis, I.P. (2007). *Polatskaya daunina*. Minsk: Medisont. (In Belarus.).
19. *Arkhitektura Belarusi: narysy evalyutsyi va uskhodneslavyanskim i eurapeiskim kantekestse: u 4 t. / redkal.: A.I. Lakotka i insh. – Minsk: Bel. navuka, 2007. – T 3: Drugaya palova XVIII – pershaya palova XIX st. – 502 s.* (In Belarus.).
20. Salaeu, A.A. (2016). Itogi arkhitekturno-arkheologicheskogo izucheniya byvshei iezuitskoi bursy. In D.U. Duk, U.A. Lobach, A.I. Korsak (Eds.) *Belaruskae Padzvinne: vopyt metodyka i vyniki palyavykh i mizhdystsyplinarykh dasledavannyau*. In 2 p. P. 1 (155–166). Novopolotsk: PSU. (In Belarus.).
21. Solov'ev, A.A. (2023). Itogi naturnykh issledovani stien i podpol'ya pervogo etazha doma po prospektu F. Skoriny, 5 [The results of the research of the underground floor of the house 5 on F. Skoryna avenue]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil Engineering. Applied Sciences]*, 3, 55–68. (In Russ., abstr. in Engl.).
22. Zakharkina, G.I., Luk"yanenko, V.G. & Solov'ev, A.A. (2012). Put' ot kollegiuma do universiteta [The way from collegium to university]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil Engineering. Applied Sciences]*, 16, 2–6. (In Russ., abstr. in Engl.).
23. Glinnik, V., & Pyarvyshyn, U. (1999). Nerealizavany praekt polatskaga zemlyamera. *Mastatstva, 1*, 37–39. (In Belarus.).
24. Solov'ev, A.A. (2014). Steklo i guta Polotskogo iezuitskogo kollegiuma kontsa XVI – nachala XIX vv. In D.U. Duk (Eds.), U.A. Lobach (Eds.), S.A. Shydouskii (Eds.) *Belaruskae Padzvinne: vopyt, metodyka i vyniki palyavykh i mizhdystsyplinarykh dasledavannyau*: zb. navuk. art. II mizhnar. navuk. kanf., Polatsk, 17–18 krasav. 2014 g.: u 2 ch. Ch. 1. (89–102). Navapolatsk: PDU. (In Russ.).
25. Solov'ev, A.A. (2026). Khram Sv. Nikolaya v s. Ropno (s. Kollektivnoe): arkhitekturno-istoricheskii analiz [St. Nicholas church in Ropno (Kollektivnaya village): architectural and historical notes]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya A, Gumanitarnyye nauki [Herald of Polotsk State University. Series A, Humanity Sciences]*, 1, 14–22. (In Russ., abstr. in Engl.).

THE ACTIVITIES OF THE POLOTSK JESUIT COLLEGIUM IN THE 17TH – EARLY 19TH CENTURIES AND ITS INFLUENCE ON THE URBAN DEVELOPMENT AND ARCHITECTURE OF POLOTSK**G. ZAKHARKINA¹⁾, A. SOLOVYOV²⁾*****(¹⁾ Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,******(²⁾ National Polotsk Historical and Cultural Museum-Reserve)***

This article examines the influence of the Polotsk Jesuit Collegium on the development of Polotsk architecture in the 17th to early 19th centuries. These processes are associated with the revival of stone construction in the city, its impact on urban planning, and the development of monumental construction after the end of the Livonian War. To this end, the building products and materials, as well as the planning and design solutions of a number of buildings erected on the collegium grounds and in Polotsk in the 17th century, are examined and compared.

During the Great Northern War (1701–1721), the Jesuits not only saved the collegium from destruction but also contributed to its expansion and improvement. Amid the general decline of Polotsk's material culture, the Jesuit residence became the main center of urban life.

In the first third of the 18th century, the Jesuits laid the foundations for the large-scale construction of the classical ensemble of the collegium. This construction began in the second third of the 18th century and was carried out according to entirely different principles than in the previous century. The study and comparison of Jesuit designs with the architectural planning and design solutions of a number of major civil and religious buildings in the city erected in the 18th centuries allows us to identify the extent of their influence on the urban development and architecture of Polotsk.

Keywords: *Polotsk Jesuit Collegium, Baroque, Classicism, building materials, structures, architecture.*

УДК 628.161.2:546.72:628.112

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-78-84

МЕХАНИЗМ ОСАЖДЕНИЯ ЖЕЛЕЗА В ПРОЦЕССЕ ВНУТРИПЛАСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ ДЛЯ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

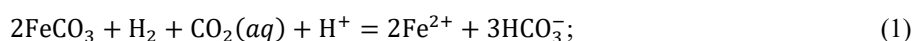
Е.И. РАШКЕВИЧ¹⁾, канд. техн. наук В.Д. ЮЩЕНКО²⁾
(Витебское областное коммунальное унитарное предприятие
водопроводно-канализационного хозяйства «Витебскоблводоканал»)
¹⁾ *selenaruko@gmail.com, ²⁾ yuvd46@mail.ru*

В статье описывается механизм осаждения железа при проведении начальных и последующих циклов внутрипластовой обработки подземной воды на разнозернистых песках для систем водоснабжения малых населенных пунктов.

Ключевые слова: *метод внутрипластовой обработки подземной воды Subterra, качество воды, технология и особенности начальных и последующих циклов «закачки-откачки» воды, механизм осаждения железа.*

Введение. В Республике Беларусь для систем хозяйственно-питьевого водоснабжения повсеместно используются артезианские подземные воды, которые имеют более высокую защиту от внешних воздействий и качество их состава по сравнению с поверхностными источниками.

Проводимый ежегодный анализ химического состава подземных вод на территории Республики Беларусь [1; 2], полученных из скважин глубиной 30–350 м четвертичных водоносных горизонтов, показал, что они могут характеризоваться как пресные гидрокарбонатные, кальциево-магниевые и кальциево-натриевые с общей минерализацией 0,2–0,4, и до 0,6 г/дм³, могут включать комплекс неорганических и органических веществ, газов, микрофлоры (железо, марганец, соли аммония и другие загрязнители), но пригодны, после соответствующей очистки, для использования в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения населенных пунктов на всей территории республики. При этом немалая часть (более 50%) эксплуатируемых скважин, особенно в бескислородно-бессульфидных подземных водах, в составе основных загрязнений подземных вод имеют только повышенные концентрации железа и марганца, а остальные показатели соответствуют нормативным значениям. Распределение этих микроэлементов в воде будет контролироваться растворимостью их карбонатов, например, FeCO₃ (PP_{FeCO₃}=2,9·10⁻¹¹). В нейтральных и слабощелочных реальных гидрогеохимических условиях, когда концентрация карбонатных ионов (HCO₃⁻+CO₃²⁻) значительно превышает концентрацию OH⁻, именно это соединение регламентирует распределение Fe²⁺, а не его закисные формы FeO и Fe(OH)₂, степень насыщения которых ниже по отношению к соединению FeCO₃. Тогда гидролиз соединения FeCO₃ в подземных водах происходит в соответствии со следующей реакцией:



$$[\text{Fe}^{2+}]^2 = 10^{-9,8} \frac{[\text{CO}_2(\text{aq})][\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]^3}. \quad (2)$$

Из указанных реакций следует, что условием, благоприятным для увеличения концентрации Fe²⁺, является рост концентрации CO₂ в водной системе и уменьшение величины pH. С ростом pH происходит обратная реакция, подземные воды приближаются к насыщению по FeCO₃ и дальнейшее накопление Fe²⁺ в этих водах замедляется. В таком случае присутствия простых миграционных форм железа подземные воды быстро очищаются при аэрировании.

В России и странах Западной Европы довольно широко применяется для удаления железа из подземных вод метод внутрипластовой обработки *Subterra*^{1,2} [3; 4]. Сущность метода заключается в ведении процесса обезжелезивания непосредственно в водоносном горизонте (слое) путем циклической «закачки-откачки» воды в одной и той же скважине. При закачке воды, предварительно обогащенной кислородом, например, воздуха, в скважину, вокруг нее происходит образование специальной зоны для окисления и осаждения железа в поровом пространстве водоносной породы. В дальнейшем из скважины производится откачка воды в систему водоснабжения населенного пункта так, чтобы у потребителей концентрация железа не превышала нормируемой величины. Затем цикл «закачки-откачки» подземной воды из скважины повторяется.

Технологическая и экономическая эффективность данного метода оценивается исходя из минералогического состава водоносных слоев и химического состава подземных вод, но, как правило, выше, чем в сооружениях наземного типа. Следует отметить, что при этом обычно соблюдается сравнительно равномерная подача воды в системы водоснабжения с расходом свыше 1000 м³/сут, когда применяются скважины с числом более двух, что упрощает проведение циклов «закачки-откачки».

¹ Болдырев К.А. Гидрохимическое моделирование процессов внутрипластовой очистки подземных вод от железа и марганца: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Болдырев Кирилл Александрович. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 2011. – 190 л.

² Государственный водный кадастр Республики Беларусь: ежегодные отчеты «Водные ресурсы, их использование и качество вод» за 2016–2024 гг. URL: <https://cricuwr.by/publications/archive-cadastral-information> (дата обращения 12.02.2026).

Системы водоснабжения малых населенных пунктов отличаются значительными изменениями режима водопотребления по расходам воды в отдельные часы и простоям в ночное время. Это приводит к тому, что применяемые для водообработки аэрационные сооружения наземного типа (ex-situ) часто приходится рассчитывать и эксплуатировать с учетом подачи воды в максимальные часы водопотребления, т.е. увеличиваются капитальные и эксплуатационные затраты. Также в отсутствие централизованной системы водоотведения возникают проблемы с отводом промывных и загрязненных вод, образующихся в процессе водоподготовки.

В связи с этим было решено выполнить исследования по возможному применению метода *Subterra* (in-situ) для удаления железа до нормируемых значений и снабжения водой именно таких малых населенных пунктов.

Экспериментальная часть. В качестве объекта исследования был принят малый населенный пункт Докшицкого района Витебской области Республики Беларусь, в котором система водоснабжения имеет две скважины, которые можно использовать попеременно как поглощающую, так и эксплуатационную. Основными водоносными слоями скважин являются песчаные породы.

До начала эксперимента в скважине № 1 качество исходной воды по основным показателям составило: концентрация общего железа Fe^0 – 2,67 (двухвалентное железо Fe^{2+} – 2,20 или 82,4% от общего), марганца – 0,36 мг/дм³. Величины pH и Eh в исходной воде были равны 7,7 и 54 мВ.

Соответственно в исходной воде скважины № 2, концентрация общего железа составила 3,08 (двухвалентное железо – 2,51 или 81,5%), марганца – 0,38 мг/дм³, а величины pH и Eh – 7,6 и 65 мВ. Низкие значения величины Eh свидетельствуют о присутствии в подземной воде этих микроэлементов преимущественно в двухвалентной форме.

Для оценки работы скважины на водопроводную сеть при проведении первого цикла «закачки-откачки» воды методом *Subterra* контрольной точкой была принята концентрация общего железа не более 0,3 мг/дм³. В процессе проведения этого эксперимента установлено следующее [5]:

- наблюдался несистемный разброс концентрации железа в откачиваемой воде (0,15–0,9), хотя в среднем эта величина не превышала 0,3 мг/дм³;
- коэффициент полезного использования метода, представляющий отношение объемов откаченной из скважины воды к закаченной (м³) $K = W_{om} / W_z$, составил 9,3. Это уже принципиально, что внутрипластовая обработка может быть применена при удалении железа из подземных вод для малых населенных пунктов;
- было отмечено улучшение органолептических показателей (≤ 2 баллов), при этом не происходило изменение концентрации аммонийных соединений – 0,2–0,3 мг/дм³, окисляемости – 1,8 мгО₂/дм³ и ухудшения параметров бактериального анализа;
- концентрация растворенного кислорода в начальный период откачки воды была равна 1,8–2,0, а к концу первого цикла снижалась до 0,5–0,8 мгО₂/дм³;
- величина pH в процессе закачки воды в скважину и дальнейшей ее прокачки практически не изменялась и составляла 7,6–7,7;
- установление величины Eh более 130–150 мВ в откачиваемой воде свидетельствует об удовлетворительном окислении двухвалентного железа и его задержании в подземном пласте.

Несистемный разброс в ходе эксперимента концентрации железа в откачиваемой воде указывает на то, что окислительная зона вокруг скважины еще окончательно не была сформирована.

По концентрациям общего и двухвалентного железа их соотношение получилось следующим:

- при $Fe^0 \geq 2,5$ соотношение $Fe^0 = 1,22Fe^{2+}$ или $Fe^{2+} = 0,82Fe^0$;
- при $Fe^0 = 0,1–0,7$ соотношение $Fe^0 = 12,5Fe^{2+}$ или $Fe^{2+} = 0,08Fe^0$;
- при $Fe^0 \leq 0,1$ соотношение $Fe^0 = 16,7Fe^{2+}$ или $Fe^{2+} = 0,06Fe^0$.

В дальнейшем были проведены семь последовательных циклов «закачки-откачки» воды рассматриваемых скважин [6], которые показали, что окислительная зона с получением устойчивых значений концентрации железа 0,05–0,20 мг/дм³ в откачиваемой воде установилась после 5-го цикла, с коэффициентом полезности равным 12,4.

Таким образом, можно считать, что данная технология in situ позволяет обеспечить более эффективную очистку подземных вод при их обезжелезивании до нормативных значений для малых объемов водопотребления по сравнению с традиционными поверхностными напорными установками и является экономически предпочтительнее. При этом для образования устойчивой окислительной зоны вокруг скважин требуется выполнить определенное число первичных циклов. Некоторые исследователи считают³, что в условиях равномерной подачи воды из скважин достаточно 2–3 цикла. Очевидно, для условий резкого изменения режима водопотребления этого недостаточно.

Механизм осаждения железа в процессе внутрипластовой обработки воды. Многие авторы [6–9] отмечают, что геохимия и механизм внутрипластовой обработки воды представляют собой сложные процессы, зависящие от типа водоносной породы, гидродинамики подземного потока, ее качества и многих других факторов.

Рассмотрим механизм осаждения железа в процессе внутрипластовой обработки воды для малых населенных пунктов при первичных и последующих циклах работы скважин.

³ См. сноску 2.

В данном случае материалом водоносных слоев рассматриваемых скважин являются кварцево-полевошпатовые пески, с комбинацией мелкого и среднезернистого состава и содержанием 60% кварца SiO_2 , 18–20% $\text{Fe}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)_3$, остальное – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ и KAlSi_3O_8 .

Тогда можно предположить, что в первичных циклах, кроме прямого окисления железа в подземном водоносном пласте, одновременно идут процессы хемосорбции кислорода в зерна полевошпатовых песков и ионный обмен ионов натрия на железо.

Прямое окисление железа происходит преимущественно за счет простого смешения объемов закаченной в пласт кислородсодержащей воды с подземной вокруг скважины на расстоянии x в результате их гидродинамической дисперсности, которая представляет собой рассеивание границы раздела между ними на внутриводном и молекулярном диффузионном уровне с созданием потока мигранта (кислорода) от начальной его концентрации C_0 до практически нулевого значения. Для песчаных водоносных пород, как одномерный случай, плотность диффузионного потока и его изменение описывается I-м законом Фика:

$$v_d = -D_M \cdot \text{grad}C = -D \partial C / \partial x; \quad (3)$$

$$D_M = \chi n_0 D_M^0, \quad (4)$$

где v_d – плотность диффузионного потока через единичную площадь в единицу времени, $\text{г}/\text{м}^2\cdot\text{сут}$;

C – концентрация мигранта (кислорода), $\text{мг}/\text{дм}^3$ ($\text{г}/\text{м}^3$);

D_M – коэффициент молекулярной диффузии, причем выбор единиц для измерения количества вещества определяется характером конкретной задачи (единицы массы, объема, моли и т.д.), например, $\text{см}^2/\text{с}$ ($\text{м}^2/\text{сут}$);

D_M^0 – коэффициент молекулярной диффузии в свободной среде, равный 10^{-4} , $\text{м}^2/\text{сут}$;

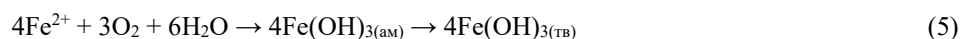
χ – параметр извилистости путей фильтрации в пористой среде, равный для несцементированных песков 0,5–0,7;

n_0 – пористость песка, принятая равной 0,32 (32%).

Согласно этому закону, величина диффузионного потока вещества через воображаемое сечение, перпендикулярное направлению диффузии, прямо пропорциональна величине концентрации в данном сечении, площади этого сечения, времени и градиенту концентрации, направленному по нормали к изоконцентрационной поверхности. Диффузия всегда является неравномерным процессом, увеличивает энтропию системы и приближает ее к состоянию равновесия. Первый закон Фика позволяет понять физический смысл коэффициента диффузии D_M , который численно равен плотности потока диффузанта при градиенте концентрации равном единице. Поскольку этот поток вещества стремится выровнять перепад потенциала или концентрации, можно сказать, что коэффициент диффузии является мерой скорости, с которой система способна при заданных условиях выровнять разности концентраций и химических потенциалов. Вследствие этого в изолированной системе имеется тенденция к исчезновению концентрационных градиентов.

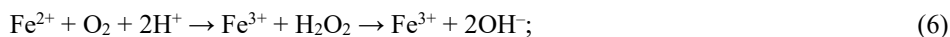
Приведенные выражения справедливы для изотермических процессов двух однотипных потоков с избытком одного и с одним смешиваемым газом или веществом, лучше при одинаковых коэффициентах диффузии, как в данном случае. Однако встречаются зоны, где коэффициент диффузии может быть значительно ниже, чем в самом водоносном слое, в котором зерна породы имеют форму вытянутых сфероидов и в свою очередь группируются в сферолиты, причем они в объеме имеют сферически симметричную форму, а около поверхностной непроницаемой области (глина – потолок водоносного слоя скважин) – вытянуты перпендикулярно поверхности, что и снижает коэффициент диффузии. Наличие таких зон усложняет решение поставленной задачи в аналитическом виде (если его вообще можно получить). Но для первоначальных выводов этим обстоятельством можно пренебречь, так как концентрационные деформации элементарного объема пренебрежимо малы по сравнению с самим объемом водоносного слоя.

В математической модели внутриводной обработки воды методом *Subterra* предполагается⁴ [5; 6], что при закачке обогащенной кислородом воды в песчаный водоносный слой происходит первичное медленное образование окислительной зоны, которое в итоге имеет вид цилиндра с высотой этого слоя и осью, совпадающей со скважиной. Радиус фронта поршневого вытеснения кислорода, равный расстоянию x , к моменту окончания закачки воды в скважину определен математическим расчетом для рассматриваемого нашего случая при закачке 300 м^3 в 3,6 м. Тогда плотность диффузионного потока через единичную площадь в единицу времени составит порядка $(-5 \cdot 10^{-5}) \text{ г}/\text{м}^2\cdot\text{сут}$. Знак минус указывает на то, что перенос растворенного кислорода в нейтральной области величины рН происходит из области большей в область меньшей концентрации, а его величина косвенно свидетельствует о медленной скорости процесса окисления водных форм двухвалентного железа. Причем по агрегатному состоянию реагирующих веществ такие реакции являются гомогенными и протекают в одной системе, например, в виде водного раствора с образованием ОН-лиганд:



⁴ См. сноску 2.

Также, возможно, протекает химическая реакция, которая имеет перекисный ионо-радикальный характер (аналогично гипотезе В.И. Вернадского):



Определяющей является реакция (6), а скорость перекисной реакции можно определить по следующей формуле:

$$dC_{\text{Fe}^{2+}}/dt = -k_p \cdot C_{\text{O}_2} \cdot C_{\text{Fe}^{3+}}, \quad (9)$$

где k_p – константа скорости реакции.

Все эти процессы приводят к выпадению осадка $\text{Fe}(\text{OH})_3$ в межпоровом объеме породы, причем значительный разброс значений концентраций железа в первоначальных циклах обработки воды объясняет то, что пока еще не произошло образование оксигидроксидов железа и окисно-каталитического пленочного слоя вокруг зерен водоносной породы.

Если в материале водоносной породы наблюдается хотя бы незначительно рыхлая поверхность и будет содержание активных групп алюмосиликатов $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, как в нашем случае, то может наблюдаться не только адсорбция кислорода на поверхности зерен, но и его хемосорбция с образованием гидроксильных групп и последующим диффундированием их из зерен.

Хемосорбция кислорода на зернах водоносного слоя есть избирательный процесс сорбции, сопровождающийся химическими реакциями в поверхностном слое. В отличие от других видов сорбции, хемосорбция кислорода на твердом теле чаще всего необратима и мала по сравнению с физической сорбцией, а реакции в поверхностном слое зависят от химической природы поверхностей и протекают медленно. Причем электроны, необходимые для их проведения, как раз поставляются алюмосиликатной группой.

Основные аспекты хемосорбции кислорода в воде на данной водоносной породе состоят в следующем:

- механизм: кислород взаимодействует с активными центрами твердого тела, образуя прочные химические связи;
- сорбенты: металлы (Fe, Cu, Zn), углеродная фаза и материалы, содержащие алюмосиликатную группу;
- факторы: процесс усиливается при увеличении температуры, турбулизации воды или изменении pH среды.

Помимо хемосорбции кислорода на твердом теле в первичных циклах, имеет значение для всего ионного состава подземных вод способность микроэлементов и их соединений удерживать на своей поверхности значительное количество поглощенных ими ионов, хотя также идет и обратный процесс, который заключается в том, что некоторая их часть может при взаимодействии с водной макросистемой обмениваться на другие ионы. Тогда в результате различных сорбционных процессов в гидрогеохимических системах «порода-вода» поверхность твердых фаз породы будет заряжена катионами и анионами и может происходить взаимный обмен [6; 7] между ионами натрия, содержащегося в водном растворе и твердом теле полевошпатных песков, на ионы двухвалентного железа, причем способность данного элемента к ионному обмену основана прежде всего на его отрицательном заряде, который возникает вследствие замещения ионов высокой валентности Fe^{2+} низковалентными Na^+ . При этом система «твердая фаза-раствор» будет электронейтральной и обмен ионами идет в соответствии с их стехиометрическим соотношением.

Ионообменные явления осложняются наличием комплексообразователей, которые могут быть образованы при координировании одним атомом одного или более ионов, а также молекулами, состоящими из центральной частицы и координированных вокруг нее лигандов (аддендов) Это хотя и уменьшает концентрацию ионов Fe^{2+} , способных к обмену, но их общая величина не изменяется.

Например, система железа Fe^{2+} с оксалат-анионом $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ образует в конечном итоге комплекс $[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$, который представляет собой двухзарядный анион, производный от щавелевой кислоты, часто выступающий в роли бидентатного лиганда. В результате способность железа не только к катионному обмену с ионами натрия, но и к сорбции на поверхности твердого тела уменьшается. Это связано еще с тем, что ионы натрия в небольшом количестве имеют необходимую степень свободы, а остальная часть входит в кристаллическую решетку зерен водоносной породы и их обмен затруднителен.

Аналогично происходит в результате растворения гидрата сульфата железа $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ с образованием аквакомплекса $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O}_6)^{2+}]^{2+}$, который в свою очередь может быть исходной формой для образования других типов комплексов. Установлено, что гидроксо- и ацидокомплексы двухвалентного железа (сульфатные и хлоридные) обладают значительно большей реакционной способностью в реакциях с кислородом по сравнению с его аквакомплексами, но при этом они могут не полностью прекращать процессы гидролиза соединений железа, особенно формы Fe^{3+} . По сравнению с $[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$ аквакомплексы имеют слабую устойчивость.

Количество всех ионов, которые участвуют в этих процессах, обозначают емкостью ионного (катионного) обмена ЕКО, мг-экв/100 г. поглощающего комплекса. Повышенное значение ЕКО (до 30 мг-экв/100 г) может наблюдаться в первых циклах обработки подземных вод и будет способствовать эффективности удаления железа. В дальнейшем на втором этапе ионообменные процессы в системе «вода-порода» будут идти очень медленно (до 3 мг-экв/100 г) или вообще прекращаться [6; 7].

Для окисления и удаления железа при образовании устойчивой окислительной зоны авторами [8] предложен механизм, который связан с заданным количеством кислорода, поданным в подземный водоносный пласт, физической адсорбцией на материале водоносной породы и использованием его в качестве акцептора электронов e^- с последующим переходом двухвалентной формы Fe^{2+} в трехвалентную Fe^{3+} . Причем скорости гетерогенного окисления превышают скорости гомогенного. Такой подход был усовершенствован и более детально рассмотрен в работах⁵ [9; 10].

Основная роль принадлежит гетерогенному окислению железа адсорбированным кислородом на зернах породы водоносного слоя. Процесс адсорбции железа на поверхности его оксигидроксидов идет с образованием комплексов, которые приводят к изменению плотности оболочки зерен породы, в результате чего происходит быстрое окисление ионов Fe^{2+} кислородом. Также возможно, что при поглощении кислорода материалами пласта происходит, особенно в процессе закачки воды в скважину, его адсорбция и хемосорбция на материале водоносного горизонта, который в период откачки постепенно расходуется на окисление железа.

Реакции этого процесса протекают на границе раздела двух фаз «твердое тело-газ» в водной среде, особенно при ее более высоких щелочных условиях и величине Eh свыше 130–150 мВ. При этом вещество $Fe(OH)_3(вод.)$ переходит путем полимеризации в $Fe(OH)_3(ам.)$, образуя вокруг скважины сплошную реакционно-активную поверхность оксигидроксидов железа на зернах породы, состоящую из гетита $FeO(OH) \cdot nH_2O$, ферригидрита $5Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ и магнетита $Fe_3O_4 \cdot nH_2O$, которые в итоге представляют окисно-каталитическую пленку.

Результаты проведенных экспериментов [2; 5] показали, что в процессе внутрислоевого удаления железа при равных объемах закачки наблюдается увеличение коэффициента полезности метода в последовательно проводимых циклах «откачки-закачки», что можно объяснить накоплением его оксигидроксидов в пространстве вокруг скважин, на поверхности которых и происходит основная часть окисления Fe^{2+} , причем выпадающие гидротригидратные формы Fe^{3+} образуют новые сорбционные центры гидроксильных групп OH^- (рисунок 1)⁶. Но в дальнейшем идет полное заполнение поверхности зерен породы оксигидроксидами, часть из них выпадает в осадок, новые порции заполняют их места, и тогда сорбционная способность пласта остается постоянной на одном уровне.

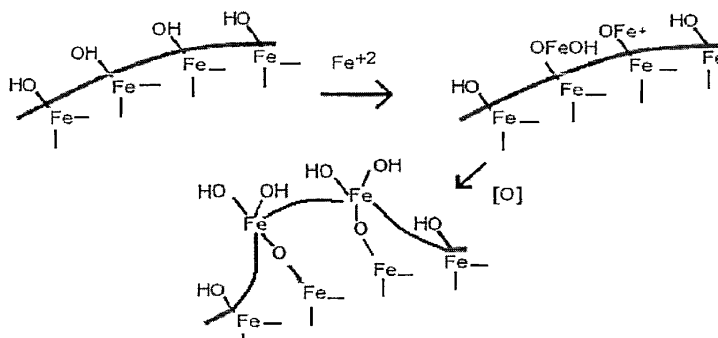


Рисунок 1. – Схема автокатализа в результате образования новых сорбционных участков в процессе выпадения оксигидроксидов железа. В результате выпадения новых порций железа увеличивается число сорбционных центров ($-OH$ -групп)

При обработке подземной воды для малых населенных пунктов в условиях большого количества последовательных циклов «закачка-откачка» в около скважинном пространстве может происходить образование железобактерий, которые синтезируют органические вещества из неорганических для своей жизнедеятельности, получают энергию для обмена веществ от окисления железа. Процессы бактериальной внутрислойной обработки подземных вод повышают эффективность удаления железа и идут одновременно с химическим его окислением.

Заключение. Результаты проведенных исследований показали принципиально возможное применение метода *Subterra* (in-situ) для удаления железа из подземных вод в системах водоснабжения малых населенных пунктов.

В первичных циклах «закачки-откачки» воды в скважине, кроме прямого окисления железа в подземном водоносном пласте, одновременно идут процессы хемосорбции кислорода на зерна полевкошпанных песков и ионный обмен ионов натрия на железо.

⁵ См. сноску 2.

⁶ См. сноску 2.

Прямое окисление железа происходит преимущественно за счет простого смешения объемов закаченной в пласт кислородсодержащей воды с подземной вокруг скважины, и для песчаных водоносных пород, как одномерный случай, плотность диффузионного потока и его изменение описывается I-м законом Фика. Причем по агрегатному состоянию реагирующих веществ такие реакции являются гомогенными и протекают в одной системе, например, в виде водного раствора с образованием ОН-лиганд.

Процесс хемосорбции кислорода на твердом теле идет с образованием гидроксильных групп и последующим диффундированием их из зерен песчаной породы. В данном случае это есть избирательный процесс сорбции, сопровождающийся медленно протекающими необратимыми химическими реакциями в поверхностном слое, и ее величина мала по сравнению с физической сорбцией.

Способность железа к ионному обмену основана прежде всего на его отрицательном заряде, который возникает вследствие замещения ионов высокой валентности Fe^{2+} низковалентными Na^+ . При этом система «твердая фаза-раствор» будет электронейтральной и обмен ионами идет в соответствии с их стехиометрическим соотношением. Ионообменные явления осложняются наличием комплексообразователей, которые хотя и уменьшают концентрацию ионов Fe^{2+} , способных к обмену, но их общая величина не изменяется.

По результатам пяти первичных откачек воды из скважин был установлен значительный разброс концентраций железа, что свидетельствует о постепенном процессе создания устойчивой окислительной зоны окисления железа.

Для окисления и удаления железа при образовании устойчивой окислительной зоны предложен механизм, который связан с физической адсорбцией кислорода на материале водоносной породы ведением гетерогенных окислительных процессов с образованием реакционно-активной поверхности оксигидроксидов удаляемого загрязнителя на зернах породы, состоящей из гетита $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$, ферригидрита $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и магнетита $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, которые в конечном итоге представляют окисно-каталитическую пленку.

Итак, в результате окисления железа гетерогенным путем $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + e^-$ в нейтральных и слабощелочных бессульфидных водах идут реакции гидролиза с гидроксильными группами $\text{Fe}(\text{OH})_n^{3-n}$ с переходом при $n=3$ в $\text{Fe}(\text{OH})_3^0$, далее $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. То есть можно предположить, что окончательный механизм и порядок окисления железа происходит исключительно за счет реакций, протекающих на активизированной поверхности водовмещающих пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудельский А.В., Пашкевич В.И. Региональная гидрогеология и геохимия подземных вод Беларуси. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 261 с.
2. Рашкевич Е.И., Ющенко В.Д. Закачка воды в подземный водоносный пласт скважины из пылевидного и средне-мелкозернистого песка при малом водопотреблении // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2022. – № 14(3). – С. 64–70. DOI: 10.52928/2070-1683-2022-32-14-64-70.
3. Середкина Е.В. Внутрипластовая очистка воды, итоги и перспективы // Водоснабжение и сантехника. – 2004. – № 2. – С. 34–38.
4. Rott U., Friedle M. 25 Jahre unterirdische Wasseraufbereitung in Deutschland // Wasser, Abwasser. – 2000. – Bd. 141, № 13. – S. 53–62.
5. Рашкевич Е.И., Ющенко В.Д. Применение метода внутрипластовой обработки подземных вод в системах водоснабжения малых населенных пунктов // Сб. науч. ст. по итогам работы Междунар. науч. форума «Наука и инновации – современные концепции» / г. Москва (11 апреля 2024 г.). – Т. 2. – М: Инфинити, 2024. – С. 215–223.
6. Крайнов С.Р., Рьженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2012. – 672 с.
7. Henry M., Jolivet J.P., Livage J. Aqueous chemistry of metal cations: Hydrolysis, condensation and complexation // Chemistry, Spectroscopy and Applications of Sol-Gel Glasses. Structure and Bonding / R. Reisfeld (Eds.), C.K. Jørgensen (Eds.). – 1992. – Bd. 77. – S. 153–206.
8. Unterrirdische Enteisung und Entmanganung ein Statusbericht / P. Groth, F. Bühring, R. Dannöhl et al. // Das Gas- und Wasserfach. – 1988. – Bd. 129, № 5. – S. 321–339.
9. Коммунар Г.М., Янбулатова Ф.Х. Кинетические закономерности окислительно-восстановительных реакций на поверхности железа и марганца. Методы расчета процессов массопереноса в гидрогеологических исследованиях. – М., 1984. – 148 с.
10. Середкина Е.В., Круглик С.И., Тесля В.Г. Кондиционирование подземных вод на геохимических барьерах // Материалы XVII Всероссийского совещания по подземным водам Востока России. – Красноярск, 2003. – 128 с.

REFERENCES

1. Seredkina, E.V. (2004). Vnutriplastovaya ochistka vody, itogi i perspektivy. *Vodosnabzhenie i santehnika*, 2, 34–38. (In Russ).
2. Rott, U. & Friedle, M. (2000). 25 Jahre unterirdische Wasseraufbereitung in Deutschland. *Wasser, Abwasser*, 141(13), 53–62. (In German).
3. Kudel'skij A.V., Pashkevich V.I. (2024). *Regional'naja gidrogeologija i geohimija podzemnyh vod Belarusi*. Minsk: Belaruskaja navuka (In Russ).
4. Rashkevich, E.I. & Yushchenko, V.D. (2022). Zakachka vody v podzemnyi vodonosnyi plast skvazhiny iz pylevidnogo i srednemelkozernistogo peska pri malom vodopotreblenii [Water injection into the underground aquifer of the well from pulverized and medium-fine-grained sand at low water consumption]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 14(3), 64–70. DOI: 10.52928/2070-1683-2022-32-14-64-70. (In Russ., abstr. in Engl.).

5. Rashkevich, E.I. & Yushchenko, V.D. (2024). Primenenie metoda vnutriplastovoi obrabotki podzemnykh vod v sistemakh vodosnabzheniya mal'kikh naseleennykh punktov. *Sb. nauch. st. po itogam raboty Mezhdunar. nauch. foruma «Nauka i innovatsii – sovremennye kontseptsii»*, 2, 215–223. (In Russ).
6. Krajnov, S.R., Ryzhenko, B.N., & Shvec, V.M. (2012). *Geohimija podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i jekologicheskie aspekty*. Moscow: Nauka (In Russ).
7. Henry, M. & Jolivet, J.P. & Livage, J. (1992). Aqueous chemistry of metal cations: Hydrolysis, condensation and complexation. *Chemistry, Spectroscopy and Applications of Sol-Gel Glasses. Structure and Bonding*, 77, 153–206. (In German).
8. Groth, P., Bühring, F., Dannöhl, R., Liessfeld, R., Olthoff, R. & Rott, U. (1988). Unterrirdische Enteisenung und Entmanganung ein Statusbericht. *Das Gas- und Wasserfach*, 129(5), 321–339. (In German).
9. Kommunar, G.M., & Janbulatova, F.H. (1984). *Kineticheskie zakonomernosti okislitel'no-vosstanovitel'nykh reakcij na poverhnosti zheleza i marganca. Metody rascheta processov massoperenosa v gidrogeologicheskikh issledovanijah*. Moscow. (In Russ).
10. Seredkina, E.V., Kruglik, S.I., & Teslja, V.G. (2003). Kondicionirovanie podzemnykh vod na geohimicheskikh bar'erah. *Materialy XVII Vserossijskogo soveshhanija po podzemnym vodam Vostoka Rossii*, 128. (In Russ).

Поступила 20.03.2026

MECHANISM OF IRON DEPOSITION IN THE PROCESS OF INTRAPLASTIC WATER TREATMENT FOR SMALL SETTLEMENTS IN THE REPUBLIC OF BELARUS

H. RASHKEVICH, V. YUSHCHENKO

(Vitebsk Regional Municipal Unitary Enterprise of water supply and sewage “Vitebskoblvodokanal”)

The article describes the mechanism of iron precipitation during initial and subsequent cycles of in-situ treatment of groundwater on fine-grained sands for small settlements' water supply systems.

Keywords: *Subterra's in-situ treatment method for underground water, water quality, technology and features of initial and subsequent water injection and extraction cycles, mechanism of iron deposition.*

УДК 621.644:620.197-027.31

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-85-89

**АНАЛИЗ ТРУБ С ВНУТРЕННИМ АНТИКОРРОЗИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ
И ИХ СРАВНЕНИЕ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТРУБАМИ ДЛЯ ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

канд. техн. наук, доц. Л.М. СПИРИДЕНКО, А.С. МАХРАНКОВ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Исследуются основные методы внутритрубной антикоррозионной защиты промысловых трубопроводов. Проводится сравнение металлических трубопроводов с неметаллическими с выявлением основных преимуществ и недостатков. На основании проведенного анализа определены основные признаки, которые помогут создать классификацию неметаллических промысловых трубопроводов.

Ключевые слова: *коррозия, внутритрубное антикоррозионное покрытие, металлический трубопровод, неметаллический трубопровод, промысловый трубопровод.*

Введение. В процессе накопления многовекового практического знания и опыта человек осознал, что именно трубчатая конструкция является одной из самых совершенных как по прочностным характеристикам, так и по функциональным признакам, поскольку может обеспечивать постоянную, легко регулируемую целевую подачу продукта в различных геологических и геодезических условиях и в нужном направлении в требуемые сроки. Трубопроводы позволяют обеспечить в процессе эксплуатации направленное, необратимое и закономерное движение транспортируемой среды.

Существуют тысячи километров трубопроводов, связанных с нефтяными скважинами, которые работают в десятках стран. Все они различаются по форме, размеру и степени сложности. Металлические трубопроводы являются основной частью нефтяной отрасли. Нефтепроводы образуют системы сбора, которые соединяют скважины с технологическими объектами. По данным Международного энергетического агентства в 2025 г. в мире было добыто 38 млрд. баррелей, из них более 45% было транспортировано с помощью нефтепроводов.

Старение или повреждение нефтепроводов создает многочисленные проблемы для нефтяной промышленности во всем мире. Вне зависимости от того, трубопровод подземный или находится на поверхности, все металлические трубопроводы подвергаются воздействию различных физических, климатических и химических факторов, которые могут вызвать коррозию.

Обычно под коррозией понимается самопроизвольное разрушение металлов или сплавов вследствие их химического, электрохимического или физико-химического взаимодействия с окружающей средой (от позднелатинского слова *corrosio* – «разъедание»). Среда, в которой металл подвергается коррозии, называется коррозионной или агрессивной. При этом процессе образуются продукты коррозии: химические соединения, содержащие металл в окисленной форме (ржавчина, окалина) [1].

Коррозия нефтепроводов не только снижает эксплуатационный срок службы трубопроводов, но также может выступать основной причиной аварий и инцидентов на производстве. В настоящее время после укладки трубопровода в грунт и запуска его в эксплуатацию можно наблюдать повреждения трубопровода от коррозии уже через 5–8 лет.

Внутренняя коррозия является одной из наиболее частых причин выхода из строя промысловых трубопроводов. Скорость внутренней коррозии промысловых трубопроводов часто превышает скорость внешней, достигая высоких показателей (более 0,5–1,0 мм/год) из-за транспортировки агрессивной среды. Внешняя коррозия медленнее (менее 0,03–0,1 мм/год), но ускоряется в агрессивных почвах, завися от качества изоляции [2].

Целью данной статьи является обеспечение наибольшей защиты трубопровода от внутреннего коррозионного воздействия.

Для достижения данной цели необходимо решить ряд задач:

- 1) выполнить обзор известных методов, позволяющий увеличить срок службы промысловых трубопроводов;
- 2) сделать анализ способов внутренней защиты стальных труб от внутреннего воздействия;
- 3) провести сравнение труб с внутренним антикоррозионным покрытием с неметаллическими трубами для промысловых трубопроводов.

Объект данного исследования – неметаллическая труба промыслового трубопровода, а предмет – внутреннее воздействие перекачиваемой среды на неметаллический промысловый трубопровод.

Основная часть. Существенным недостатком металлических труб является их подверженность коррозионным разрушениям. Это ведет к сокращению срока службы трубопровода, огромной потере металла, увеличению шероховатости внутренней поверхности стенок труб, что вызывает дополнительные энергозатраты на перекачку жидкости.

Зачастую трубопровод находится в сложных климатических условиях или условиях агрессивной коррозионной среды. В соответствии с этим защита от коррозии нефтепроводов является одной из основных задач при прокладке новых трубопроводов и эксплуатации уже существующих.

Основная проблема нефтедобывающих компаний – это аварии из-за коррозии на промысле и, как следствие, уменьшение срока эксплуатации промысловых нефтепроводов.

Существует несколько способов увеличения срока службы промысловых трубопроводов:

- 1) применение ингибиторов – этот способ не является целью данного исследования;
- 2) защита стальных труб от внутреннего воздействия – данный способ будет затронут в данной статье;
- 3) замена стальных труб на неметаллические – именно этот путь будет основным рассмотренным в данной статье.

Внутритрубное покрытие должно обладать высокими защитными свойствами, обеспечивающими сохранность труб на период транспортировки, а также иметь высокую долговечность в процессе эксплуатации.

Основные задачи внутреннего покрытия труб схожи с задачами наружных покрытий, а именно: обеспечение целостности трубы при ее транспортировке до места установки или хранения, повышение эксплуатационного срока службы трубопровода и другие.

Также внутреннее защитное покрытие трубопровода способствует снижению отложений парафина на стенках трубопроводов, тем самым увеличивает пропускную способность, повышает общую надежность эксплуатируемого нефтепровода и облегчает процессы очистки и контроля качества нефтегазопроводов.

Основными параметрами, определяющими выбор конкретного типа изоляционного покрытия, являются защитные свойства покрытия, срок службы покрытия, технологические параметры и режимы эксплуатации трубопровода. Наиболее популярными в использовании считаются лакокрасочные материалы, в основе которых находятся эпоксидные, модифицированные эпоксидные, а также фенолформальдегидные смолы. Также широко применяются эпоксидные порошковые материалы, нанесение которых происходит поверх фенольного праймера. Немаловажным фактором является правильный выбор технологии нанесения покрытия. Он зависит от длины участка трубопровода, типа покрытия, диаметра трубы и т.д.

Трубы с внутренним антикоррозионным покрытием можно классифицировать по назначению [3]:

1. Антикоррозионные покрытия применяются для внутритрубной изоляции тех труб, которые транспортируют коррозионно-агрессивные среды. В нефтяной промышленности к таким средам относятся водонефтегазовые эмульсии, пластовая вода, оборотная вода системы поддержания пластового давления.

2. Гладкостные покрытия применяют, как правило, на магистральных нефтегазопроводах при транспортировке неагрессивных продуктов.

На сегодняшний день наиболее распространенные внутритрубные антикоррозионные покрытия можно разделить на три основные группы¹:

1. Покрытия из силикатных материалов (стеклоэмалевые покрытия).

2. Покрытия из полимерных материалов, которые в зависимости от физического состояния в процессе их нанесения подразделяются на:

- 2.1. Лакокрасочные материалы (представляющие собой растворы полимеров).

- 2.2. Порошковые материалы (наносимые в виде расплавов).

- 2.3. Пленочные.

3. Комбинированные покрытия (полимерцементная изоляция).

Данные способы помогают уменьшить шероховатость труб, что приводит к снижению сопротивляемости.

Но эти способы имеют и свои отрицательные эффекты, а именно:

- 1) увеличение стоимости строительства в связи с более дорогим производством труб;

- 2) сложность нанесения покрытия: данные покрытия наносятся в заводских условиях;

- 3) сложность монтажа труб для сварки труб с внутренним покрытием: необходим обученный персонал и специальная подготовка труб перед сварочными работами.

В современном быстро развивающемся мире важна не только экологическая безопасность, но и увеличение скорости строительства промысловых нефтепроводов при снижении капитальных и эксплуатационных затрат. Данную проблему могут решить неметаллические трубопроводы.

В настоящее время новые конструкционные материалы нашли применение при изготовлении силовых элементов строительных конструкций, арматуры и напорных трубопроводов, рабочих колец центробежных насосов, резервуаров и емкостей и т.д.

В последнее время наблюдается растущий интерес к применению неметаллических материалов для строительства промысловых трубопроводов. Наиболее популярными неметаллическими материалами для строительства промысловых трубопроводов являются композитные материалы на основе углеродного волокна и полимерные материалы.

Полимерные трубопроводы получили свое широкое распространение благодаря их высокой стойкости к коррозии и агрессивным средам. Эти материалы обладают хорошей гибкостью, что важно при прокладке в сложных рельефных условиях, а также легкостью, что упрощает транспортировку и монтаж.

Композитные материалы, армированные углеродными или стеклянными волокнами, обеспечивают еще большую прочность и стойкость к давлению по сравнению с традиционными полимерными трубами. Эти материалы характеризуются низкой массой и высокой жесткостью.

¹ Анализ пассивных методов защиты от коррозии магистральных нефтегазопроводов. URL: https://studbooks.net/2572477/tovarovedenie/vnutrennie_pokrytiya_truboprovodov.

Классифицировать неметаллические промышленные трубопроводы можно по следующим признакам:

1. По материалу изготовления:
 - полимерные материалы;
 - композитные материалы.
2. По условиям прокладки:
 - подземная прокладка (открытый (траншейный) способ, бесканальная, бестраншейная прокладка (закрытый способ);
 - наземная прокладка (укладка на специально подготовленное грунтовое основание);
 - надземная прокладка (опоры и эстакады – трубы размещаются выше уровня земли (на стойках, мачтах).
3. По наличию защитного покрытия:
 - без защитного покрытия (для материалов, устойчивых к воздействию окружающей среды);
 - с защитным покрытием (для защиты материала от механических повреждений, ультрафиолета или агрессивных сред).
4. По назначению:
 - выкидные линии – это трубопроводы для перекачивания продуктов скважин (нефть, природный газ, примеси) до групповой замерной установки;
 - нефтегазосборные коллекторы – это трубопроводы для перекачивания от групповой замерной установки до дожимной насосной станции;
 - нефтесборные коллекторы – это трубопроводы, расположенные от дожимной насосной станции до центрального пункта сбора;
 - газосборный коллектор – это трубопровод для перекачивания газа от пункта сепарации до компрессорной станции;
 - промышленные газопроводы для сбора попутного нефтяного газа – это газопроводы, работающие при давлении газа выше атмосферного и вакуумные газопроводы;
 - промышленные ингибиторопроводы – это трубопроводы, служащие для подачи ингибиторов и других химических реагентов в скважины и на другие объекты обустройства нефтяных, нефтегазовых и газовых месторождений.
 - промышленные водопроводы – это трубопроводы, предназначенные для подачи воды к нагнетательным скважинам с целью поддержания пластового давления и для сбора пластовых вод, добытых вместе с нефтью, в водоносные горизонты.
5. По диаметру данная классификация позволит нам распределить трубопроводы по применимым материалам:
 - 1-класс – трубопроводы номинальным диаметром 450 мм и более – на данный момент трубы больших диаметров экономически выгодно производить из стали, так как трубы больших диаметров и не уступающие своими прочностными характеристиками из неметаллических материалов дорогие в производстве;
 - 2-класс – трубопроводы номинальным диаметром от 200 мм до 450 мм – согласно ГОСТ Р 59411-2021 «Трубопроводы промышленные из стеклопластиковых труб. Правила проектирования и эксплуатации» для стеклопластиковых труб максимально допустимый номинальный диаметр 450 мм;
 - 3-класс – трубопроводы номинальным диаметром до 200 мм включительно – согласно ГОСТ Р 70623-2023 «Трубопроводы промышленные. Трубопроводы из гибких полимерных армированных труб. Правила проектирования, монтажа и эксплуатации» для полимерных армированных труб максимально допустимы номинальный диаметр 200 мм.
6. По рабочему давлению данная классификация позволит нам распределить трубопроводы по применимым материалам:
 - 1-класс – при рабочем давлении свыше 21,0 МПа – при данном давлении необходимо применять стальные трубопроводы;
 - 2-класс – при рабочем давлении свыше 10,0 МПа до 21,0 МПа включительно – согласно ГОСТ Р 59411-2021 «Трубопроводы промышленные из стеклопластиковых труб. Правила проектирования и эксплуатации» для стеклопластиковых труб максимальное рабочее давление не превышает 21,0 МПа;
 - 3-класс – при рабочем давлении свыше 2,5 МПа до 10,0 МПа включительно – согласно п.7.1.1 ГОСТ Р 70623-2023 «Трубопроводы промышленные. Трубопроводы из гибких полимерных армированных труб. Правила проектирования, монтажа и эксплуатации»;
 - 4-класс – при рабочем давлении свыше до 2,5 МПа включительно – согласно п.7.1.1 ГОСТ Р 70623-2023 «Трубопроводы промышленные. Трубопроводы из гибких полимерных армированных труб. Правила проектирования, монтажа и эксплуатации».

Предлагаемая классификация поможет определиться с классом неметаллического трубопровода по давлению и диаметру, а также выбрать способ прокладки и необходимость применения изоляции.

В таблице 1 сведены данные по неметаллическим трубам, металлическим трубам с внутренним антикоррозионным покрытием и без антикоррозионного покрытия.

Таблица 1. – Сравнение металлических труб с внутритрубным антикоррозионным покрытием и без покрытия с неметаллическими трубами

Материал трубопровода	Металлические			Композитные	Полимерные
	Без внутреннего покрытия	Покрытия из силикатных материалов	Покрытия из полимерные материалов		
Внутренне покрытие				Стеклопластиковые трубы	Полимерно-армированные трубы
Материал покрытия	–	Стеклоэмалевые	Порошковые, лакокрасочные		
Максимальный диаметр, мм	1420,00	530,00	530,00	450,00	200,00
Максимальное давление, МПа	32,00	10,00	10,00	21,00	32,00
Защита сварных соединений	В заводских и полевых условиях	В заводских и полевых условиях	В заводских условиях	Сборочный стык	Фланцевое и муфтовое соединение
Преимущества	Стоимость сварочных работ ниже, чем у труб с внутренним покрытием	Не разрушается в среде с большим содержанием сероводорода	Большой выбор производителей и материалов	Коррозионная стойкость, высокий срок эксплуатации, возможность демонтажа без повреждения труб	Коррозионная стойкость, долговечность, меньшая совокупная стоимость строительства и эксплуатации
Недостатки	Подверженность металла коррозии	Высокая стоимость сварных соединений	Подверженность металла коррозии в зоне сварных соединений в полевых условиях	Низкая трещиностойкость при действии нагрузок поперек волокон	Большие динамические нагрузки вызывают деформацию тела трубы

В таблице 1 можно увидеть, что основное преимущество неметаллических трубопроводов заключается в их неподверженности коррозии как внешней, так и внутренней, благодаря чему увеличивается их срок эксплуатации. Также немаловажными преимуществами неметаллических трубопроводов являются скорость их монтажа и возможность демонтажа без повреждения труб, а также меньший объем земляных работ, чем у металлических трубопроводов при одинаковой пропускной способности, что увеличивает скорость строительства. При этом остальные характеристики не уступают трубопроводам из металла. Но при всех преимуществах неметаллические трубопроводы хуже справляются с большими перепадами давления. Также отсутствие применения неметаллических труб для строительства промысловых трубопроводов обусловлено недостатком нормативной документации, регламентирующей проектирование, строительство и эксплуатацию неметаллических трубопроводов.

Заключение. Результатом данной работы является рассмотрение возможности применения промысловых нефтепроводов из неметаллических материалов. Проведено сравнение металлических трубопроводов с антикоррозионным покрытием и без него с трубопроводами из стеклопластиковых и полимерно-армированных труб. Проведен анализ существующих классификаций для металлических промысловых трубопроводов с внутритрубным антикоррозионным покрытием, выявлены признаки, которые позволили создать классификацию для неметаллических трубопроводов, которые в дальнейшем помогут при выборе материалов для промысловых трубопроводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клышко И.Н., Кульбей А.Г. Системы электрохимической защиты объектов трубопроводного транспорта. – Новополоцк: ПГУ, 2006. – 192 с.
2. К вопросу о коррозии промысловых трубопроводов / С.М. Ватузов, И.М. Ванчугов, К.С. Резанов и др. // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – № 5(145). – С. 106–122. DOI: 10.17122/nij-oil-2023-5-106-122.
3. Виды внутренних полимерных покрытий трубопроводов и их деление по назначению [Электронный ресурс] / В.А. Залетаев, Д.В. Муленко, В.В. Сенякин и др. // Материалы XIII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум – 2021». – URL: <https://scienceforum.ru/2021/article/2018026553> (дата обращения 11.09.2021).

REFERENCES

1. Klyshko, I.N., & Kul'bei, A.G. (2006). *Sistemy elektrokhimicheskoi zashchity ob"ektov truboprovodnogo transporta*. Novopolotsk: PGU. (In Russ.).
2. Vatzov, S.M., Vanchugov, I.M., Rezanov, K.S., Avtomonov, P.Yu., Tanasenko, M.S., & Shestakov, R.A. (2023). K voprosu o korrozii promyslovykh truboprovodov. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov*, 5(145), 106–122. DOI: 10.17122/ntj-oil-2023-5-106-122.
3. Zaletaev, V.A., Mulenko, D.V., Senyakin, V.V., & Borovskaya, L.V. (2021). Vidy vnutrennikh polimernykh pokrytii truboprovodov i ikh delenie po naznacheniyu. In *Materialy XIII Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchnoi konferentsii «Studencheskii nauchnyi forum – 2021»*. URL: <https://scienceforum.ru/2021/article/2018026553>.

Поступила 03.03.2026

**ANALYSIS OF PIPES WITH AN INTERNAL ANTI-CORROSION COATING
AND THEIR COMPARISON WITH NON-METALLIC PIPES FOR INDUSTRIAL PIPELINES**

L. SPIRIDENOK, A. MAHRANKOV
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The main methods of in-line anti-corrosion protection of field pipelines are investigated. A comparison of metal pipelines with non-metallic ones is carried out to identify the main advantages and disadvantages. Based on the analysis, the main features are identified that will help create a classification of non-metallic field pipelines.

Keywords: *corrosion, in-line anti-corrosion coating, metal pipeline, non-metallic pipeline, field pipeline.*

ГЕОДЕЗИЯ

УДК 004.942:528.2/.3

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-90-95

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СЕТИ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

П.С. ДОЛГИЙ, А.С. ИВАШНЁВА

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье описаны процесс и результаты геодинимического исследования на основе данных спутниковой сети точного позиционирования Республики Беларусь, проведенного в рамках выполнения гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований. Описан алгоритм трансформирования координат двух эпох к начальной эпохе наблюдений. Даны формулы вычисления компонентов деформаций (дилатация, сдвиг, направление и величина максимального и минимального растяжений) на основе тензора деформаций. Описана методика построения деформационных карт и представления их в среде веб-ГИС-проекта. Приведены результаты анализа вновь построенных деформационных карт для таких тектонических структур как Припятский прогиб, Белорусская антеклиза, Микашевичско-Житковичский выступ, Брестская впадина, Латвийская седловина, Оршанская впадина. В результате подтверждена активность некоторых разломных структур на территории Беларуси.

Ключевые слова: ГИС-проект, геодинамика, повторные наблюдения, компоненты деформации, представление геодинимических явлений в ГИС, генератор геометрии QGIS.

Введение. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Х24М-049 от 02.05.2024). Авторами статьи в 2020 году уже выполнялись исследования геодинимических движений по данным спутниковой сети точного позиционирования Республики Беларусь (далее – ССТП РБ). Предыдущая работа охватила эпохи от начала действия станций ССТП РБ (2014–2017 гг.) по 2020 г. В рамках настоящего исследования закуплены данные в формате `gipex` на эпохи 2021–2025 годов. Также привлекались свободно распространяемые данные Европейской сети постоянно действующих пунктов (EPN), в которую на территории Беларуси включены 11 пунктов¹.

Обработка данных осуществлялась в программном комплексе Trimble Business Center (TBC) и включала в себя импорт данных из формата `gipex`, выбор необходимых базовых линий, обработку базовых линий, уравнивание с фиксацией одной из станций. В результате получены отчеты об уравнивании сети на каждую эпоху в формате `html`-документа. Такой формат неудобен для анализа, поэтому был разработан модуль `tbc_parser` на языке программирования `python`, который извлекает данные из `html`-документов и выполняет их дальнейшую обработку: трансформирование координат и вычисление компонентов деформаций.

В результате обработки ГНСС-измерений на две эпохи получают плановые координаты в двух независимых системах, следовательно, возникает задача трансформирования (преобразования) координат. Координаты для двух исследуемых эпох преобразуются по отношению к начальной эпохе (в нашем случае – начало действия станций ССТП РБ). Для этого необходимо выполнить две независимые операции: определить преобразующие коэффициенты (параметры) на основании общих точек; преобразовать координаты точек, координаты которых известны лишь в одной системе координат.

Основная часть. В нашем случае использовалась твердотельная модель преобразования, которая предусматривает равномерный разворот всех точек на угол φ и сдвиг их по осям на величины t_x и t_y .

Твердотельную модель преобразования можно описать формулами:

$$\begin{aligned} X_n &= X_c \cdot \cos\varphi - Y_c \cdot \sin\varphi + t_x; \\ Y_n &= X_c \cdot \sin\varphi + Y_c \cdot \cos\varphi + t_y, \end{aligned} \quad (1)$$

где t_x и t_y – сдвиги по осям;

φ – угол поворота (элементы преобразования);

X_c, Y_c – координаты в старой системе координат;

X_n, Y_n – координаты в новой системе координат.

На основе формул (1), имея общие точки, координаты которых известны в обеих системах координат, можно определить преобразующие коэффициенты. Очевидно, что для однозначного определения параметров

¹ EUREF Permanent GNSS Network. URL: https://epncb.oma.be/_networkdata/stationlist.php.

преобразования между двумя отдельными системами координат достаточно иметь количество уравнений, равное количеству неизвестных параметров. В твердотельной модели три неизвестных параметра, следовательно, для однозначного решения достаточно двух общих точек. Однако для контроля и оценки точности берется избыточное число точек, что приводит к переопределенной системе (1).

Для получения преобразующих коэффициентов переопределенную систему (1) возможно решить различными способами на основе метода наименьших квадратов. Один из них известен как «метод растягивания». Запишем переопределенную систему (1) в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} (Y_c)_1 - (Y_n)_1 \\ (X_c)_1 - (X_n)_1 \\ (Y_c)_2 - (Y_n)_2 \\ (X_c)_2 - (X_n)_2 \\ \dots \\ (Y_c)_n - (Y_n)_n \\ (X_c)_n - (X_n)_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (X_c)_1 & 1 & 0 \\ -(Y_c)_1 & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ (X_c)_n & 1 & 0 \\ -(Y_c)_n & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi \\ t_x \\ t_y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

или в свернутом виде:

$$K_n = A \cdot k, \quad (3)$$

где A – матрица плана;
 k – вектор коэффициентов.

Для получения решения запишем уравнение поправок для переопределенной системы (3):

$$v = A \cdot \hat{k} - K_n. \quad (4)$$

На основе условия метода наименьших квадратов $v^T v = \min$ переходим к совместной системе нормальных уравнений

$$\begin{aligned} A^T A \cdot \hat{k} &= A^T \cdot K_n; \\ N \cdot \hat{k} &= f, \end{aligned} \quad (5)$$

где N – матрица коэффициентов нормальных уравнений;
 f – вектор свободных членов системы нормальных уравнений.
Итеративное решение системы (6) методом обращения дает

$$\hat{k} = (A^T A)^{-1} A^T \cdot K_n, \quad (6)$$

где $Q = (A^T A)^{-1} = N^{-1}$ – обратная весовая матрица вектора уравненных параметров.
Для оценки точности вычислим стандартное отклонение модели преобразования:

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{v^T v}{n-k}}, \quad (7)$$

где n – количество уравнений;
 k – количество определяемых параметров.

Для оценки точности уравненных величин (коэффициентов и координат в новой системе) необходимо определить корреляционные матрицы данных величин. Корреляционные матрицы для уравненных параметров (9) и уравненных координат точек в новой системе координат (10):

$$K_k = \hat{\sigma}_0^2 \cdot Q; \quad (8)$$

$$K_f = \hat{\sigma}_0^2 \cdot A Q A^T. \quad (9)$$

Извлекая корень из диагональных элементов корреляционных матриц, получаем средние квадратические ошибки для соответствующих величин [1].

По трансформированным координатам производится вычисление компонентов деформаций. Компоненты деформаций – безразмерные величины, характеризующие изменение конфигурации плоского объекта. К ним относят:

- дилатацию – показывает относительное изменение площади треугольника, обозначается буквой Q ;
- максимальный сдвиг – показывает относительный сдвиг центра треугольника, обозначается γ_m ;
- величины (E_1, E_2) и направление (φ_1, φ_2) максимального и минимального растяжений – показывают отношение длин отрезков E_1, E_2 , расположенных в направлениях φ_1, φ_2 , во вторую эпоху к длине в первую эпоху.

На вход программы, помимо координат на две эпохи, необходимо подать конфигурацию сети – какие станции относятся к каким треугольникам. В нашем случае ввод конфигурации реализован через полигональный шейп-файл. Расчет компонентов деформаций осуществляется для тех треугольников, для которых имеются данные на начальную, а также две исследуемые эпохи.

Расчет компонентов деформации осуществлялся путем составления системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned}\Delta X_1 &= X_1 e_{11} + Y_1 e_{12} + a; \\ \Delta Y_1 &= X_1 e_{21} + Y_1 e_{22} + b; \\ \Delta X_2 &= X_2 e_{11} + Y_2 e_{12} + a; \\ \Delta Y_2 &= X_2 e_{21} + Y_2 e_{22} + b; \\ \Delta X_3 &= X_3 e_{11} + Y_3 e_{12} + a; \\ \Delta Y_3 &= X_3 e_{21} + Y_3 e_{22} + b,\end{aligned}\tag{10}$$

где a, b – величины перемещения по осям X, Y ;

X_i, Y_i – значения координат в узлах треугольника.

На основании использования теории малых деформаций, метода конечных элементов и модели локально-однородного деформирования, полученной по данным о современных горизонтальных движениях земной коры, деформации характеризуются с помощью тензора (2).

$$|T_{ij}| = \begin{vmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{vmatrix},\tag{11}$$

где e_{ij} – компоненты тензора, относящиеся к центру треугольника.

Используя различные сочетания компонентов тензора деформации, определяются компоненты деформации по формулам [2]:

$$Q = e_{11} + e_{22};\tag{12}$$

$$E_1 = \frac{Q}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + (e_{12} + e_{21})^2};\tag{13}$$

$$E_2 = \frac{Q}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + (e_{12} + e_{21})^2};\tag{14}$$

$$\gamma_m = E_1 - E_2 = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2},\tag{15}$$

где γ_m – максимальный сдвиг;

$\gamma_1 = (e_{11} - e_{22})$ и $\gamma_2 = (e_{12} + e_{21})$ – компоненты сдвига вдоль осей координат.

С использованием компонентов сдвига вычислены направления главных осей деформаций ϕ_{E_1}, ϕ_{E_2} :

$$\phi_{E_1, E_2} = \frac{1}{2} \arctg \left(-\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right) + A^0.\tag{16}$$

Для однозначного определения ϕ руководствуемся следующим правилом: если $\gamma_1 > 0$, то $A=90^\circ$, если $\gamma_1 < 0$, то $A=0^\circ$.

Вычисленные компоненты деформаций сохраняются в виде атрибутивной таблицы в полигональный шейп-файл с треугольниками ГНСС-сети. Геометрия треугольников копируется из входного файла конфигурации сети.

По результатам вычисления компонентов деформаций построены тематические карты: дилатации, сдвига, максимального и минимального растяжений.

Для построения тематических карт необходимо определить условные знаки для отображения геодинамических явлений и настроить соответствующие им стили в программном комплексе QGIS.

Дилатация и деформация сдвига отображаются с помощью изолиний, построенных методом многоуровневой сплайновой интерполяции. Для дилатации изолинии стилизуются с помощью цветовой шкалы: положительные значения отображаются красным цветом, отрицательные – синим, нулевые – зеленым. Направления максималь-

ного и минимального растяжений отображаются взаимно перпендикулярными стрелками соответствующего направления и пропорциональной длины с подписями значений. Для автоматизации построения деформационных карт растяжения разработана модель геообработки в редакторе моделей QGIS. Для построения карты необходимо выбрать файл с треугольниками и задать местоположение выходных файлов. В процессе работы модели создаются точечные слои, необходимые для подписи значений максимального и минимального растяжений. К построенной карте добавляются дополнительные слои, такие как тектонические разломы и границы тектонических структур. Готовая карта передается по протоколу WMS с помощью QGIS Server на клиентское веб-приложение (рисунок 1).

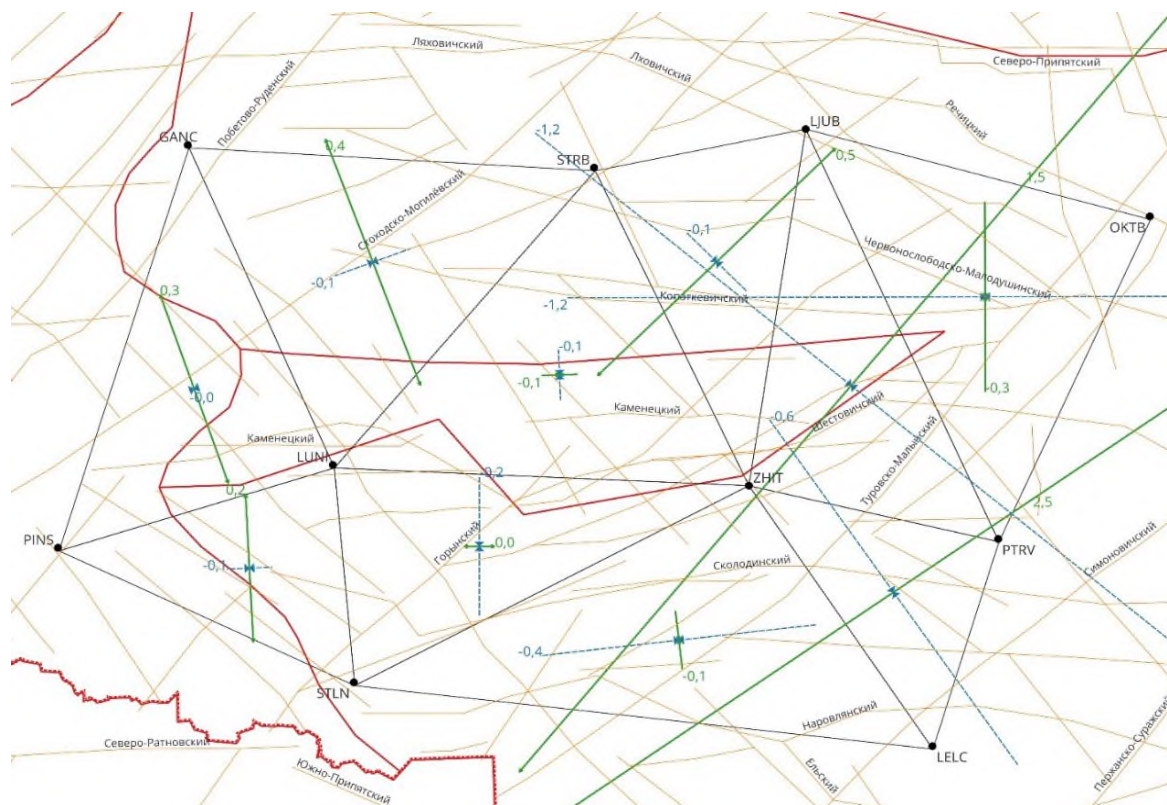


Рисунок 1. – Пример карты деформаций сдвига в среде веб-ГИС-проекта. Житковичский полигон, эпоха 2024–2025 гг.

По имеющимся данным были построены карты деформаций на каждую эпоху, а также итоговые карты между первой и последней эпохами. Анализируя деформационные карты на каждую из эпох, можно заметить, что направления максимального и минимального растяжений от эпохи к эпохе меняются на перпендикулярные, а дилатация меняется с положительной на отрицательную. Это может говорить о влиянии ошибок измерений на изменение координат станций сети. С целью выявить результирующие изменения построены карты между первой и последней эпохами наблюдений.

Гомельский полигон практически полностью находится в пределах Припятского прогиба – относительно молодой тектонической структуры с выраженной современной динамикой. На востоке также попадает на территорию Воронежской антеклизы, на севере – на Жлобинскую седловину и Бобовнянский выступ белорусской антеклизы. Полигон представляет интерес, т.к. расположен в наиболее промышленно освоенном регионе. На данной территории добывается нефть, калийные и каменные соли.

В целом для Гомельского полигона выявлена высокая активность, наибольших величин достигающая в треугольниках Калинковичи – Светлогорск – Речица, Светлогорск – Жлобин – Речица, Хойники – Лоев – Речица, Добруш – Лоев – Речица, Бобруйск – Жлобин – Светлогорск, Бобруйск – Довск – Жлобин (Северо-Припятский, Речицкий, Лоевский разломы). Максимальное растяжение в самые активные эпохи тяготеет к направлению юго-запад – северо-восток. Дилатация во все эпохи распределена неравномерно. Наибольший градиент дилатации наблюдается в северо-восточных треугольниках полигона, образованных станциями Жлобин, Бобруйск, Довск, Чечерск, Речица. Эти пункты опрашивают северную границу Припятского прогиба, Северо-Припятский, Кошелевский, Малиновско-Глазовский разломы.

Житковичский полигон охватывает такие структуры как западная часть Припятского прогиба, Микашевичско-Житковичский выступ, восточная часть Полесской седловины. В промышленном отношении в данном регионе добывается строительный камень. Представляет интерес Стоходско-Могилевский разлом, пересекающий полигон в направлении с юго-запада на северо-восток.

В целом Житковичский полигон характеризуется невысокой активностью по сравнению с Гомельским. В отдельные эпохи активность проявили треугольники Старобин – Любань – Житковичи и Житковичи – Петриков – Лельчицы (максимальное растяжение $0,6 \cdot 10^{-7}$). Дилатация в эпохи после 2020 года распределена неравномерно, наибольший градиент наблюдается в восточной части полигона (станции Любань, Октябрьский, Петриков, Житковичи). Восточные треугольники опрашивают такие структуры как восточный склон Микашевичско-Житковичского выступа, Червонослободско-Малодушинский, Копаткевичский разломы. Величина сдвига не превышает $1,0 \cdot 10^{-7}$, за исключением эпохи 2024–2025 годов, в которую в восточной части величина сдвига достигает $3,0 \cdot 10^{-7}$. Треугольники, опрашивающие Стоходско-Могилевский разлом, не показали его высокой активности.

Брестский полигон расположен на территории Брестской впадины, Луковско-Ратновского горста. Интерес представляют Южно-Ратновский и Северо-Ратновский разломы, являющиеся продолжением молодой структуры – Припятско-Донецкого грабена. В промышленном отношении интерес представляют участки нефтепроводов и газопроводов.

Брестский полигон характеризуется достаточно высокой активностью. Дилатация распределена равномерно и за исключением эпох 2018–2019, 2021–2022, 2023–2024 имеет тенденцию к увеличению в направлении с юго-запада на северо-восток. Сдвиг распределен неравномерно. Максимальный градиент приурочен к северной части полигона (станции Берёза, Ивацевичи, Телеханы, Дрогичин, Пружаны). В эпоху 2018–2019 величина максимального сдвига достигает $7,0 \cdot 10^{-7}$, а величина максимального и минимального растяжений $2,1 \cdot 10^{-7}$ и $-5,4 \cdot 10^{-7}$ соответственно. Полагаем, что активность приурочена к Каменецкому, Ляховичскому, Берестовицкому разломам.

Островецкий полигон расположен в пределах Белорусской антеклизы. Территорию пересекают Ошмянский, Островецкий, Мядельский разломы. В пределах полигона располагается эпицентр исторической тектонической активности – Гудогайского землетрясения 1908 года. Безусловно, интересным в промышленном отношении является объект повышенной опасности – Белорусская АЭС.

Островецкий полигон характеризуется значительной активностью. Величина дилатации треугольников, пересекаемых Ошмянским разломом, в отдельные эпохи достигает $1,6 \cdot 10^{-7}$. Прослеживается тенденция к образованию локальных максимумов и минимумов в районе Сморгони. Сдвиг в отдельные эпохи достигает $3,5 \cdot 10^{-7}$. Белорусская АЭС находится в зоне действия этих деформаций. Однако следует учесть, что, во-первых, на картах изолинии, проходящие в районе АЭС, показывают смоделированные интерполяцией модельные значения дилатации, а реальные значения могут отличаться; во-вторых, АЭС лежит в стороне от разрывных структур. В случае движения активных блоков земной коры, площадка АЭС будет двигаться вся целиком, что не вызовет её разрушений. Более того, АЭС спроектирована с большим запасом сейсмической прочности.

Полоцкий полигон находится в пределах Латвийской седловины, северного склона Белорусской антеклизы, западной части Оршанской впадины. Интерес представляют Полоцкий, Чашникский, Туровлянский, Бегомльский разломы. В промышленном отношении важными объектами являются Полоцкая и Витебская ГЭС, нефтепровод Унеча – Полоцк. Добыча полезных ископаемых в основном связана с приповерхностными отложениями четвертичного периода, а также с залежами доломитов девонского возраста в Витебском районе.

В целом Полоцкий полигон характеризуется невысокой активностью, выделяются только треугольники Бешенковичи – Витебск – Лиозно, Лиозно – Витебск – Городок, Городок – Витебск – Оболь, проявляющие активность во все эпохи. Считаем активность связанной с Руднянским и Витебским разломами. Значительные величины максимального и минимального растяжений встречаются также у треугольников Верхнедвинск – Россоны – Новополоцк и Верхнедвинск – Шарковщина – Новополоцк. Эти треугольники опрашивают Полоцкий разлом, активность которого ранее подтверждалась более детальными исследованиями [3].

Старобинский полигон охватывает часть Припятского прогиба севернее Микашевичско-Житковичского выступа. Станция Старые дороги принадлежит к Бобовнянскому выступу Белорусской антеклизы. Данная территория интересна в геодинамическом отношении, т.к., во-первых, имеет важнейшее промышленное значение: здесь расположено одно из крупнейших в мире месторождений калийных солей, во-вторых, здесь неоднократно наблюдались сейсмические явления техногенного характера.

По результатам исследований Старобинский полигон проявил невысокую активность со значениями дилатации, сдвига и растяжений, редко превышающими $1 \cdot 10^{-7}$. Дилатация и сдвиг распределены равномерно, направления растяжений варьируются от эпохи к эпохе.

Заключение. В ходе исследования были получены новые данные о деформациях земной коры и построены новые деформационные карты. Авторы применили не использовавшийся ими ранее при геодинамических исследованиях подход, предполагающий трансформирование координат по отношению к первой эпохе, для чего разработали собственный модуль. В результате выявлена активность ряда тектонических структур: Северо-Припятского, Кошелевского, Малиновско-Глазовского, Каменецкого, Ляховичского, Берестовицкого, Ошмянского, Островецкого, Мядельского, Руднянского, Витебского, Полоцкого разломы. Вместе с тем ряд разломов, активность которых подтверждалась более ранними исследованиями, не проявили ожидаемой активности: Стоходско-Могилевский, Выжевско-Минский. Для дальнейшего понимания механизма движения пунктов ССТП РБ необходимо детализировать исследования с привлечением других типов данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дегтярев А.М., Ивашнева А.С. Анализ подходов к решению задачи трансформирования систем координат на основе разных представлений данных // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2020. – № 8. – С. 9–14.
2. Шароглазова Г.А. Применение геодезических методов в геодинамике: учеб. пособие. – Новополоцк: ПГУ, 2002. – 192 с.
3. Шароглазова Г.А., Товбас С.К., Маркович К.И. Инструментальные исследования современной геодинамики в Полоцком регионе // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16. – С. 153–155.

REFERENCES

1. Degtyarev, A.M., & Ivashneva, A.S. (2020). Analiz podkhodov k resheniyu zadachi transformirovaniya sistem koordinat na osnove raznykh predstavleniy dannykh [Analysis of approaches to solving the problem of coordinate system transformation based on different data representations]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F. Civil engineering. Applied sciences]*, (8), 9–14. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Sharoglazova, G.A. (2002). *Primenenie geodezicheskikh metodov v geodinamike [Application of geodetic methods in geodynamics: A textbook]*. Polotsk State University. (In Russ.).
3. Sharoglazova, G.A., Tovbas, S.K., & Markovich, K.I. (2015). Instrumental'nye issledovaniya sovremennoy geodinamiki v Polotskom regione [Instrumental research of modern geodynamics in the Polotsk region]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series F. Civil engineering. Applied sciences]*, (16), 153–155. (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 27.03.2026

NEW RESULTS OF GEODYNAMIC STUDIES BASED ON DATA FROM THE SATELLITE-BASED PRECISE POSITIONING NETWORK OF THE REPUBLIC OF BELARUS

P. DOLHI, A. IVASHNEVA
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article describes the process and results of a geodynamic study based on data from the satellite-based precise positioning network of the Republic of Belarus, carried out under a grant from the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research. An algorithm for transforming coordinates from two observation epochs to the initial observation epoch is described. Formulas for calculating strain components (dilatation, shear, magnitude and direction of maximum and minimum extension) based on the strain tensor are given. The methodology for constructing deformation maps and presenting them within a web GIS project environment is described. The results of the analysis of newly constructed deformation maps for such tectonic structures as the Pripyat Trough, Belarusian Antecline, Mikashevichi-Zhitkovichi Horst, Brest Basin, Latvian Saddle, and Orsha Basin are presented. The study confirms the activity of certain fault structures on the territory of Belarus.

Keywords: *GIS project, geodynamics, repeated observations, strain components, representation of geodynamic phenomena in GIS, QGIS Geometry Generator.*

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Zeng Liyun, Hil A., Li Yufeng</i> Wood as a structural material: current state of the issue, problems, prospects.....	2
<i>Лазовский Д.Н., Глухов Д.О., Хаткевич А.М., Гиль А.И., Колтунов А.И., Чапаранганда Э.</i> Расчет напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при воздействии нагрузки и высокой температуры.....	11
<i>Haо Min, Tur V.</i> Study on the compressive mechanical properties of recycled aggregate expansive concrete	25
<i>Савина Е.Н., Мойсейчик Е.А., Яковлев А.А., Кулан А.В.</i> Опыт применения лазерного сканирования при проведении натурных испытаний железобетонной плиты перекрытия над автомобильным паркингом совместно с ВМ-технологиями	34
<i>Савина Е.Н., Яковлев А.А., Кулан А.В., Мойсейчик Е.А.</i> Системы мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций в составе цифрового двойника зданий и транспортных сооружений с применением дополненной и виртуальной реальности	42
<i>Свиcтун А.Л., Пантелеев К.В., Романюк В.Н.</i> Использование метода сканирующего зонда Кельвина для ранней диагностики коррозии трубопроводной стали	50
<i>Велюго Е.С.</i> Оптимизация регенерации природного цеолита клиноптилолита в двухступенчатой схеме очистки подземных вод	59
<i>Захаркина Г.И., Соловьёв А.А.</i> Деятельность Полоцкого иезуитского коллегиума в XVII – начале XIX вв. и его влияние на градостроительство и архитектуру Полоцка.....	65
<i>Рашкевич Е.И., Ющенко В.Д.</i> Механизм осаждения железа в процессе внутрипластовой обработки воды для малых населенных пунктов Республики Беларусь	78
<i>Спириденюк Л.М., Махранков А.С.</i> Анализ труб с внутренним антикоррозионным покрытием и их сравнение с неметаллическими трубами для промышленных трубопроводов	85

ГЕОДЕЗИЯ

<i>Долгий П.С., Иваши́ва А.С.</i> Новые результаты геодинимических исследований по данным спутниковой сети точного позиционирования Республики Беларусь	90
---	----