

Received: 09.02.2026

Revised: 24.04.2026

Accepted: 05.06.2026

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.3.006-019

NANOMODIFIED CORROSION-RESISTANT POLYMER CONCRETES TO BE USED IN CHEMICAL INDUSTRY ENVIRONMENTS

A. V. Polin^{a,*} and G. I. Shaidurova^b

Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolskiy Ave., Perm, 614990, Russia

^a  <https://orcid.org/0009-0009-7605-9563>  aleksei-polin1978@mail.ru;

^b  <https://orcid.org/0000-0002-5110-7858>  sgi615@iskra.perm.ru

*Corresponding author. Email: aleksei-polin1978@mail.ru

Address for correspondence: Komsomolskiy prosp., 29, Perm, 614990, Russia

Tel.: +7 (902) 833-0790

The development of the chemical industry requires the creation of durable building materials resistant to the combined effects of aggressive environments, mechanical loads, and temperature fluctuations. Promising materials for such conditions are polymer concretes based on epoxy resins reinforced with glass fiber. However, their durability is limited by the imperfect structure of the matrix–fiber–filler interface. This paper studies the targeted modification of the interphase zone with silicon dioxide (SiO₂) and aluminum oxide (Al₂O₃) nanoparticles. The scientific novelty lies in interrelating quantitatively and qualitatively the type and content of nanoadditives, the degree of compaction of the interphase region, and the improvement of the barrier properties of the composite as a whole. Scanning electron microscopy, energy dispersive analysis (EDS), and impedance spectroscopy are used to identify the formation of a denser and more homogeneous structure at the interface between the phases upon the introduction of 0.5 and 1.0 wt% nanoparticles. The results of long-term corrosion resistance tests in 10% H₂SO₄ and NaOH solutions and in a 5% NaCl solution for 180 days at 40 °C show that nanomodified samples demonstrate an up to 40% decrease in water absorption, an up to 88% increase in the retention of flexural strength after exposure (compared to 58–78% for the control), and a 15–25% increase in impact strength. A specific effect of the modifiers has been found; namely, Al₂O₃ is more effective in acidic environments and SiO₂ is more effective in alkaline ones. The obtained results make it possible to design polymer concrete compositions with a predictable service life for specific operating conditions in the chemical industry.

Keywords: polymer concrete, glass fiber, nanomodification, silicon dioxide, aluminum oxide, interface, barrier properties, corrosion resistance, chemical industry, mechanical properties, durability, composite material, impact strength, aggressive environment, adhesion, diffusion, nanocomposite

References

1. Zhang, Z., Rao, F., Ye, G., and Liu, J. Mechanical performance and void structure change of foamed cement paste subjected to static and cyclic loading under plane strain conditions. *Materials*, 2022, 15 (5), 1711. DOI: 10.3390/ma15051711.
2. Loginova, S., Tanichev, M., and Kalinin, A. Study of corrosion resistance of nanomodified concrete in biologically aggressive environments. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*, 2024, 14 (4), 217–222. DOI: 10.31407/ijeec.
3. Siyanov, A.I. and Yaroshevich, D.K. Studies of lightweight concrete strength at different temperature regimes. *Construction and Geotechnics*, 2024, 15 (2), 49–59. (In Russian). DOI: 10.15593/2224-9826/2024.2.04.

4. Ta, X., Zhang, Y., Wan, Z., Shi, P., and Zhou, J. Study on preparation and performance of CO₂ foamed concrete for heat insulation and carbon storage. *Materials*, 2023, 16 (7), 2725. DOI: 10.3390/ma16072725.
5. Liu, H., Li, Q., Ni, S., Wang, L., Yue, G., and Guo, Y. Effect of nano-silica dispersed at different temperatures on the properties of cement-based materials. *Journal of Building Engineering*, 2022, 46, 103750. DOI: 10.1016/j.job.2021.103750.
6. Padavala, S.S.A.B., Ramesh kode, V., and Dey, S. Sustainable concrete development towards the eco-friendly construction: enhancing the strength and durability by using fly ash and silica fume. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 2024, 9 (1), 50. DOI: 10.1007/s41024-024-00407-5.
7. Zhang, M., Ma, D., He, J. and Han, Y. Sulfate corrosion resistance of foundation concrete with nano-particles. *Magazine of Civil Engineering*, 2023, 119 (3), 11901. DOI: 10.34910/MCE.119.1.
8. Shi, X., Xie, N., Fortune, K., and Gong, J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments. *Construction and Building Materials*, 2012, 30, 125–138. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038.
9. Wang, Y., Wu, Z., Zheng, X., Li, K., and Liu, C. A review of concrete exposed to low-temperature environments at early ages: mechanical properties and durability. *Journal of Building Engineering*, 2025, 111, 113122. DOI: 10.1016/j.job.2025.113122.
10. Iskandarov, M.Kh., Pichugin, A.P., Pchel'nikov, A.V., Tulyaganov, A.K., and Vagina, T.A. Methods of functional nanomodification in the development and scientific submission of paint and varnish coatings for metal structures of bridge structures. *Stroitelnye Materialy*, 2026, 1–2, 105–114. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2026-843-1-2-105-114.
11. Rawat, G., Gandhi, S., and Murthy, Y.I. Durability aspects of concrete containing nano-titanium dioxide. *ACI Materials Journal*, 2023, 120 (2), 25–35. DOI: 10.14359/51738490.
12. Kanagasuntharam, S., Ramakrishnan, S., Muthukrishnan, S., and Sanjayan, J. Effect of magnetorheological additives on the buildability of 3D concrete printing. *Journal of Building Engineering*, 2023, 74, 106814. DOI: 10.1016/j.job.2023.106814.
13. Nigam, M. and Verma, M. Effect of nano-silica on the fresh and mechanical properties of conventional concrete. *Forces in Mechanics*, 2023, 10, 100165. DOI: 10.1016/j.finmec.2022.100165.
14. Ahmad, J., González-Lezcano, R.A., Majdi, A., Ben Kahla, N., Deifalla, A.F., and El-Shorbagy, M.A. Glass fibers reinforced concrete: overview on mechanical, durability and microstructure analysis. *Materials*, 2022, 15 (15), 5111. DOI: 10.3390/ma15155111.
15. Feng, H., Haoliang, W., and Dengwu, J. Effect of magneto-rheological response on early hydration and microstructure of cement paste. *Construction and Building Materials*, 2025, 474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141161.
16. Brzozowski, P., Strzałkowski, J., Rychtowski, P., Wróbel, R., Tryba, B., and Horszczaruk, E. Effect of nano-SiO₂ on the microstructure and mechanical properties of concrete under high temperature conditions. *Materials (Basel)*, 2022, 15 (1). DOI: 10.3390/ma15010166.
17. Chekravarty, D., Mallika, A., Sravana, P., and Rao, S. Effect of using nano silica on mechanical properties of normal strength concrete. In: *Materials Today: Proceedings of International Conference on Advances in Materials Science*, 2022, 51, 2573–2578. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.409.
18. Osipov, S. and Prischepa, I. Algorithm of estimation of the degree of porosity homogeneity of foamed concretes by local volumes by X-ray computed tomography method. *Materials*, 2023, 16 (8), 3244. DOI: 10.3390/ma16083244.
19. Khan, K., Ahmad, W., Amin, M.N., and Nazar, S. Nano-silica-modified concrete: a bibliographic analysis and comprehensive review of material properties. *Nanomaterials (Basel)*, 2022, 12 (12), 1989. DOI: 10.3390/nano12121989.
20. Brusentseva, T.A. Effect of silicium dioxide nanoparticles on the mechanical properties of epoxy nanocomposites. In: *VIII Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennaya 50-letiyu osnovaniya Instituta khimii nefi* [The 8th All-Russian Scientific

and Practical Conference with International Participation, Devoted to the 50th Birthday of the Institute of Petroleum Chemistry: Abstracts]. TGU Publ., Tomsk, 2019, pp. 267–268. (In Russian). DOI: 10.17223/9785946218412/178.

21. Sohail, M.G., Kahraman, R., Al Nuaimi, N., Gencturk, B., and Alnahhal, W. Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes. *Journal of Building Engineering*, 2021, 33, 101669. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101669.

22. Feng, Y., He, C., Wen, Y., Zhou, X., Xie, X., Ye, Y., and Mai, Y.-W. Multi-functional interface tailoring for enhancing thermal conductivity, flame retardancy and dynamic mechanical property of epoxy/Al₂O₃ composites. *Composites Science and Technology*, 2018, 160, 42–49. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.03.009.

23. Tanimola, J.O. and Efe, S. Recent advances in nano-modified concrete: enhancing durability, strength, and sustainability through nano silica (nS) and nano titanium (nT) incorporation. *Applications in Engineering Science*, 2024, 19, 100189. DOI: 10.1016/j.apples.2024.100189.

24. Apostolopoulos, C. and Koulouris, K. Corrosion effects on durability of RC structures. *Metals*, 2021, 11, 1812. DOI: 10.3390/met11111812.

25. Stelmakh, S.A., Shcherban, E.M., Beskopylny, A.N., Mailyan, L.R., Meskhi, B., Beskopylny, N., Dotsenko, N., and Kotenko, M. Nanomodified concrete with enhanced characteristics based on river snail shell powder. *Applied Sciences*, 2022, 12 (15), 7839. DOI: 10.3390/app12157839.

26. GOST 10180-2012. (In Russian).

27. Chousidis, N. and Constantinides, G. Fire endurance and corrosion resistance of nano-modified cement mortars exposed to elevated temperatures. *Ceramics International*, 2023, 49 (11), part B, 19182–19193. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.03.044.

28. Yang, Q., Yang, Q., Peng, X., Xia, K., and Xu, B. A review of the effects of nanomaterials on the properties of concrete. *Buildings*, 2025, 15 (13), 2363. DOI: 10.3390/buildings15132363.

29. Abdalla, J.A., Thomas, B.S., Hawileh, R.A., and Syed Ahmed Kabeer, K.I. Influence of nanomaterials on the water absorption and chloride penetration of cement-based concrete. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 65 (2), 2066–2069. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.06.427.

30. Gorbunov, S.S. *Mekhanicheskie svoystva nanokompozitov polimer-neorganicheskikh napolniteley* [Mechanical Properties of Nanocomposites based on Polymer-Inorganic Fillers: Doctoral Thesis]. Moscow, 2019, 320 p.

31. Gladkovsky, S.V., Cherkasova, T.S., Savray, R.A., and Petrova, S.V. Influence of B₄C, SiC and Al₂O₃ reinforcing particles on physico-mechanical and tribological properties of aluminum matrix composites. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, Metallovedenie*, 2024, 26 (2), 48–56. (In Russian). DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.06.

32. Garipov, A.R., Makarov, D.B., Khozin, V.G., and Stepanov, S.V. Finely dispersed bitumen emulsion for the modification of cement concrete for road use. *Stroitelstvo i Arkhitektura*, 2022, 13 (3), 85–97. (In Russian). DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.08.

33. Abdrakhimov, V.Z. The use of metallurgical calcium, aluminum and iron-containing slags in the production of heatresistant concrete based on orthophosphoric acid. *Vestnik PNIPU. Stroitelstvo i Arkhitektura*, 2022, 13 (1), 82–95. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.07.

34. Shcherban, E.M., Stelmakh, S.A., Beskopylny, A., Mailyan, L.R., Meskhi, B., and Varavka, V. Nanomodification of lightweight fiber reinforced concrete with micro silica and its influence on the constructive quality coefficient. *Materials*, 2021, 14 (23), 7347. DOI: 10.3390/ma14237347.

35. Guvalov (Kapanakchi), A.A., Abbasova, S.İ., and Ahmadli, N.Z. Nanomodified self-compacting concrete based on recycled aggregates. *Chemical Problems*, 2025, 1 (23), 125–130. DOI: 10.32737/2221-8688-2025-1-125-130.

36. Tabish, M., Zaheer, M.M., and Baqi, A. Effect of nano-silica on mechanical, microstructural and durability properties of cement-based materials: a review. *Journal of Building Engineering*, 2023, 65, 105676. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.105676.

37. Artamonova, O.V., Chernyshov, E.M., and Slavcheva, G.S. Factors and mechanisms of nanomodification cement systems in the technological life cycle. *Magazine of Civil Engineering*, 2022, 109 (1), 10906. DOI: 10.34910/MCE.109.6.

Подана в журнал: 09.02.2026

УДК 691.342

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.3.006-019

НАНОВОЛОКНИСТЫЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ ПОЛИМЕРБЕТОНЫ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СРЕДАХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

А. В. Полин^{а, *}, Г. И. Шайдурова^б

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Комсомольский проспект, д. 29, Пермь, 614990, Россия*

^а  <https://orcid.org/0009-0009-7605-9563>  aleksei-polin1978@mail.ru;

^б  <https://orcid.org/0000-0002-5110-7858>  sgi615@iskra.perm.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: aleksei-polin1978@mail.ru
Адрес для переписки: Комсомольский пр-т, д. 29, г. Пермь, 614990, Россия
Тел.: +7 (902) 833-07-90

Развитие химической промышленности требует создания долговечных строительных материалов, устойчивых к комплексному воздействию агрессивных сред, механических нагрузок и температурных колебаний. Перспективными материалами для таких условий являются полимербетоны на основе эпоксидных смол, армированные стекловолокнистым наполнителем. Однако их долговечность ограничена несовершенством структуры межфазного взаимодействия на границах «матрица – волокно – наполнитель». В данной работе исследовано целенаправленное модифицирование межфазной зоны наночастицами диоксида кремния (SiO_2) и оксида алюминия (Al_2O_3). Научная новизна заключается в установлении количественно-качественных взаимосвязей между типом и содержанием нанодобавок, степенью уплотнения межфазной области и улучшением барьерных свойств композита в целом. Методами сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа и импедансной спектроскопии установлено формирование более плотной и гомогенной структуры на границе раздела фаз при введении 0,5 и 1,0 масс. % наночастиц. Результаты испытаний на длительную коррозионную стойкость в 10-процентных растворах H_2SO_4 и NaOH и в 5-процентном растворе NaCl в течение 180 суток при 40 °С показали, что наномодифицированные образцы демонстрируют снижение водопоглощения до 40 %, увеличение сохранения прочности при изгибе после воздействия до 88 % (против 58–78 % у контроля) и рост ударной вязкости на 15–25 %. Установлена специфичность действия модификаторов: Al_2O_3 более эффективен в кислых средах, SiO_2 – в щелочных. Полученные результаты позволяют проектировать композиции полимербетонов с прогнозируемым ресурсом для конкретных условий эксплуатации в химических производствах.

Ключевые слова: полимербетон, стекловолокно, наномодифицирование, диоксид кремния, оксид алюминия, межфазная граница, барьерные свойства, коррозионная стойкость, химическая промышленность, механические свойства, долговечность, композитный материал, ударная вязкость, агрессивная среда, адгезия, диффузия, нанокompозит

1. Введение

Эксплуатация строительных конструкций (полы, фундаменты, резервуары, облицовки) в цехах химических, фармацевтических, микробиологических и металлургических производств сопряжена с постоянным или периодическим воздействием широкого спектра агрессивных сред: концентрированных и разбавленных минеральных кислот (серной, соляной, азотной), щелочей (гидроксидов натрия, калия), окислителей, органических растворителей и

сложных многокомпонентных технологических растворов [1–5]. Согласно статистическим данным, до 40 % отказов и аварийных ситуаций на подобных предприятиях косвенно или напрямую связаны с коррозионным разрушением строительных конструкций [6–7]. Традиционные бетоны на портландцементном вяжущем в таких условиях подвергаются быстрой и необратимой деградации вследствие процессов кислотной, сульфатной, магниевой коррозии, а также коррозии стальной арматуры, что приводит к катастрофическому снижению несущей способности, частым неплановым и затратным ремонтам, а также к повышению эксплуатационных рисков [8–10]. Эффективной альтернативой служат полимербетоны (ПБ) – композиционные материалы, где в качестве матрицы (вяжущего) используются синтетические полимерные смолы (эпоксидные, фурановые, полиэфирные, винилэфирные), а в качестве наполнителя – химически инертные минеральные заполнители (кварцевый песок, щебень, микрокремнезем) [11–13]. Для восприятия изгибающих, ударных и знакопеременных нагрузок в состав ПБ вводят дискретное или непрерывное армирующее стекловолокно, получая стекловолокнистый (стеклоармированный) полимербетон (САПБ), который сочетает химическую стойкость полимерной матрицы с высокими прочностными и деформативными характеристиками [14–17]. Однако долговечность САПБ в экстремальных условиях зачастую лимитируется не собственно стойкостью компонентов, а структурной неоднородностью на границах раздела фаз «полимерная матрица – стекловолокно» и «матрица – минеральный наполнитель» [18–19]. Эти межфазные переходные зоны (Interfacial Transition Zones – ITZ), формирующиеся в процессе изготовления композита, характеризуются пониженной плотностью, повышенной пористостью, градиентом свойств и остаточными напряжениями. Они становятся предрасполагающими и ускорительными каналами для диффузии агрессивных функциональных агентов (ионов H^+ , OH^- , Cl^- , SO_4^{2-} , молекул воды) вглубь массива материала [20]. Последующее проникновение приводит к комплексу негативных процессов: набуханию и пластификации полимерной матрицы, гидролизу связующего, коррозии поверхности стекловолокна с выщелачиванием ионов щелочных металлов, росту внутренних напряжений. Кумулятивный эффект выражается в потере адгезии, расслоении композита и катастрофическом снижении его несущей способности задолго до исчерпания ресурса основного объема материала [21–22]. Таким образом, повышение барьерных (защитных) свойств именно межфазных границ является критически важной научно-технической задачей для увеличения срока службы САПБ.

Современным и высокоэффективным подходом к управлению микроструктурой и свойствами композитов является наномодифицирование [23–25]. Введение высокодисперсных частиц (менее 100 нм) в полимерную матрицу позволяет целенаправленно влиять на процессы структурообразования на нано- и микроуровне. Наночастицы, распределяясь в объеме полимера и избирательно адсорбируясь на поверхности армирующих элементов и наполнителя, способны выполнять несколько ключевых функций: уплотнение структуры за счет эффекта нанонаполнителя, снижение усадочных деформаций при полимеризации, блокирование зарождения и развития микротрещин [26, 27]. Наиболее значимым является их воздействие на межфазный слой. Концентрируясь в этой области, наночастицы могут формировать плотный промежуточный каркас, увеличивая реальную площадь контакта фаз, изменяя реологию матрицы в приграничной зоне и усиливая адгезионное взаимодействие за счет развития огромной удельной поверхности и возможного химического модифицирования поверхностей [28–29]. Среди множества наномодификаторов частицы аморфного диоксида кремния (SiO_2) и оксида алюминия (Al_2O_3) представляют особый практический интерес благодаря их промышленной доступности, относительно низкой стоимости, нетоксичности, а также сочетанию высокой удельной поверхности с химической инертностью в определенных диапазонах pH [30–31]. Исследования показывают, что SiO_2 , обладая высокой поверхностной энергией и гидрофильностью, активно взаимодействует с полярными группами эпоксидных смол, способствуя их более полному отверждению и повышая плотность сетки сшивок [3, 32]. Имея более высокий модуль упругости, Al_2O_3 может эффективно перераспределять

механические напряжения и блокировать развитие трещин [33]. Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных наномодифицированию полимерных и цементных композитов, количественные взаимосвязи между типом, дисперсностью, концентрацией нанодобавок SiO_2 и Al_2O_3 , степенью трансформации морфологии и локальных свойств межфазной границы в стекловолокнистом полимербетоне и, как следствие, комплексом его итоговых эксплуатационных характеристик (барьерных, коррозионных, механических) в условиях моделирования конкретных технологических сред химических производств остаются изученными недостаточно полно [34, 35]. Малоисследованным является и вопрос о специфичности защитного действия данных наномодификаторов в средах с разным pH, что имеет прямую практическую значимость при подборе состава для заданных условий эксплуатации. Целью настоящей работы является комплексное исследование влияния наноразмерных частиц SiO_2 и Al_2O_3 на процессы структурообразования межфазных границ в эпоксидном стекловолокнистом полимербетоне, установление взаимосвязи между микроструктурой модифицированной границы раздела фаз и барьерными свойствами композита, а также оценка долговечности материала в условиях длительного воздействия модельных агрессивных сред, имитирующих эксплуатацию в химической промышленности.

2. Материалы и экспериментальные методы исследований

2.1. Материалы и приготовление композитов

В качестве полимерной матрицы использовалась широко распространенная эпоксидная смола холодного отверждения марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) с отвердителем полиэтиленполиамином (ПЭПА) в соотношении 10 : 1 по массе. Минеральный наполнитель включал два фракционированных компонента: кварцевый песок фракции 0,1–0,3 мм (очищенный, с содержанием SiO_2 не менее 99 %) и микрокремнезем (удельная поверхность 15–25 м²/г). Соотношение компонентов «смола / минеральный наполнитель» было принято постоянным и равным 1:3 по массе, что является типичным для конструкционных полимербетонов [36]. Армирование осуществлялось дискретным хаотично ориентированным стекловолокном (ровинг из электроизоляционного Е-стекла, нарезанный на отрезки длиной 12 мм) в количестве 3 % от общей массы композита. В качестве наномодификаторов применялись пирогенный диоксид кремния марки Aerosil® A380 с номинальным размером первичных частиц 7 нм и удельной поверхностью 380 ± 30 м²/г (гидрофильный) и наноразмерный γ -оксид алюминия со средним размером частиц 40 нм и удельной поверхностью 35–45 м²/г.

2.2. Технология приготовления наномодифицированных составов

Для обеспечения равномерного распределения агломерированных наночастиц применялась двухэтапная технология диспергирования:

- 1) предварительное введение наномодификатора в эпоксидную смолу и интенсивное ручное перемешивание в течение 10 минут;
- 2) обработка полученной суспензии на ультразвуковом диспергаторе UZDN-2T (частота 22 кГц, мощность 500 Вт, время 15 минут) с водяным охлаждением (температура суспензии не превышала 30 °С).

После получения однородной наномодифицированной смолы в нее при непрерывном перемешивании последовательно вводили отвердитель, минеральный наполнитель и отрезки стекловолокна. Общее время перемешивания на этом этапе не превышало 5 минут во избежание повреждения волокон. Готовую формовочную смесь укладывали в стальные формы, уплотняли на виброплощадке в течение 2 минут.

Были изготовлены образцы двух типов:

- балочки размером 40 × 40 × 160 мм для механических испытаний;
- пластины 100 × 100 × 10 мм для исследования структуры и коррозионных испытаний.

Отверждение композитов проходило по следующему режиму: выдержка при температуре 25 ± 2 °C в течение 24 часов, последующая термообработка в сушильном шкафу при 80 °C в течение 6 часов. Были приготовлены и исследованы три серии составов: Контроль (К) – САПБ без наномодификаторов; САПБ-S – САПБ с добавкой нано-SiO₂ в количестве 0,5 и 1,0 масс. % от массы эпоксидной смолы; САПБ-A – САПБ с добавкой нано-Al₂O₃ в количестве 0,5 и 1,0 масс. % от массы эпоксидной смолы.

2.3. Методы исследования

Исследование морфологии и микроструктуры излома, межфазных границ и распределения наночастиц проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Jeol JSM-6510LV в режиме низкого вакуума при ускоряющем напряжении 15–20 кВ с использованием энергодисперсионного микроанализа (ЭДС) на приставке Oxford Instruments X-Act. Оценку барьерных свойств, характеризующих сопротивление материала проникновению ионов электролита, проводили методом электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС) на анализаторе импеданса Р-45Х в ячейке с двумя электродами из нержавеющей стали, между которыми помещался исследуемый образец-пластина, погруженный в 3-процентный раствор NaCl (диапазон частот – от 10^5 до 10^{-2} Гц, амплитуда переменного сигнала – 10 мВ). По полученным диаграммам Найквиста определяли параметр сопротивления переносу заряда (R_{pr}). Коррозионные испытания на химическую стойкость проводили в термостатированных емкостях при температуре 40 ± 2 °C в течение 180 суток в модельных агрессивных средах: 10-процентный водный раствор серной кислоты (H₂SO₄), 10-процентный водный раствор гидроксида натрия (NaOH) и 5-процентный водный раствор хлорида натрия (NaCl). Периодически образцы извлекали, промывали, высушивали и взвешивали для определения водопоглощения (W) по формуле

$$W = \frac{(m_w - m_d)}{m_d \times 100\%},$$

где m_d – масса сухого образца; m_w – масса образца после насыщения водой.

Предел прочности при изгибе (σ_i) определяли на универсальной разрывной машине ИР 5047-50 по трехточечной схеме нагружения согласно ГОСТ 10180-2012. Ударную вязкость (a_t) определяли на маятниковом копре КМ-5 по методу Шарпи на образцах с надрезом. Все механические испытания проводили как на исходных образцах, так и на образцах после коррозионного воздействия.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Микроструктура и барьерные свойства межфазных границ

Результаты микроструктурных исследований представлены на СЭМ-микрофотографиях (рис. 1). В контрольном составе (рис. 1 а) наблюдаются выраженные зазоры и дефекты адгезии на границе стекловолокна с матрицей, а также микропоры в приграничной области, что подтверждается энергодисперсионным анализом, указывающим на локальное изменение элементного состава и неоднородность данной зоны. В наномодифицированных образцах (рис. 1 б для SiO₂) наблюдается существенное уплотнение переходной зоны. Наночастицы, концентрируясь на поверхности волокна и частиц наполнителя, формируют плотный промежуточный слой, что способствует увеличению площади контакта и более эффективной передаче напряжений. Данные импедансной спектроскопии подтверждают эффект уплотнения. Импедансные спектры показали значительное увеличение сопротивления переносу заряда (R_{pr}) для модифицированных составов. Для образца с 1 % Al₂O₃ значение R_{pr} превысило контрольное в 3,2 раза, что прямо свидетельствует о снижении проницаемости материала для ионов электролита и улучшении барьерных свойств межфазных границ [24].

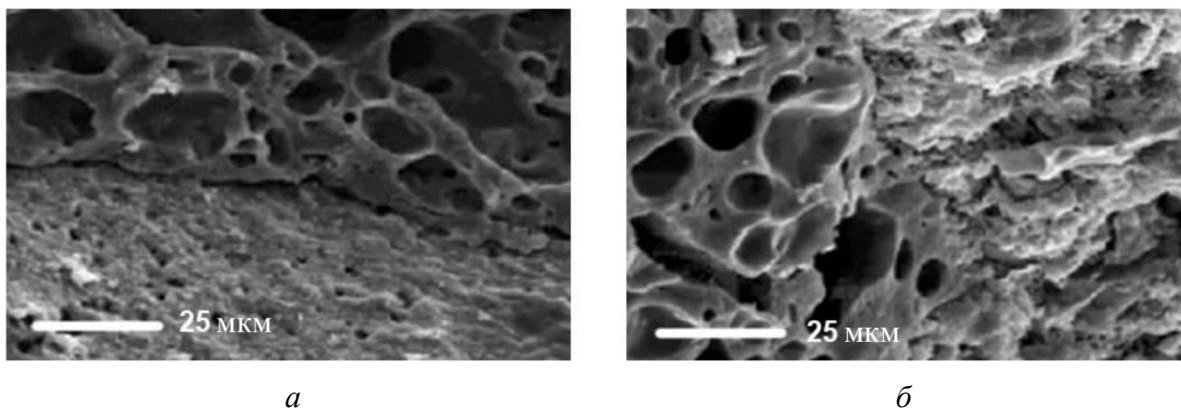


Рис. 1. СЭМ-микрофотографии излома композитов: контрольный образец (а); образец, модифицированный 1 % SiO_2 (б)

3.2. Коррозионная стойкость и механические свойства после воздействия

Результаты коррозионных испытаний после 180 суток экспозиции представлены в таблице и на рис. 2. Данные наглядно демонстрируют преимущество наномодифицированных составов. Контрольный образец свидетельствует о снижении исходной прочности при изгибе от 22 % (в NaCl) до 42 % (в NaOH). Образцы с наночастицами показывают значительно меньшую деградацию. Максимальный эффект отмечен для состава с Al_2O_3 в серной кислоте и состава с SiO_2 в щелочи, где сохранение прочности достигается до 88 %. Это подтверждает тезис о специфичности действия наномодификаторов в зависимости от pH среды: Al_2O_3 более устойчив в кислотах, а SiO_2 – в щелочах [26]. Во всех средах наномодифицированные образцы показали снижение водопоглощения на 30–40 % по сравнению с контролем. В исходном состоянии наномодификация привела к росту σ_i на 10–15 % и a_i на 12–18 % по сравнению с контролем. После коррозионного старения разница в свойствах стала более выраженной. Динамика изменения ударной вязкости (a_i) в процессе старения в H_2SO_4 (10-процентной концентрации) представлена на рис. 3. Контрольный образец показывает быстрое снижение a_i в первые 60 суток, что связано с проникновением кислоты по дефектным межфазным границам. К 180 суткам его ударная вязкость снижается почти на 50 %. Кривые деградации для наномодифицированных образцов, особенно с Al_2O_3 , являются более пологими. Сохранение более высоких значений a_i (уменьшение на 20–25 %) свидетельствует о том, что уплотненная наночастицами межфазная зона эффективно тормозит диффузию агрессивной среды и препятствует охрупчиванию матрицы [28].

3.3. Механизм повышения долговечности

Полученные данные коррелируют с результатами исследований, подчеркивающих роль структуры контактной зоны в долговечности композитов [19–31]. Предполагаемый механизм защиты включает:

- физическое уплотнение межфазного слоя и блокирование пор наночастицами;
- увеличение длины пути диффузии агрессивного агента;
- возможное химическое взаимодействие наночастиц с проникающими ионами, приводящее к их частичной нейтрализации [37].

Таким образом, комплекс проведенных исследований позволил установить фундаментальные и прикладные закономерности влияния наночастиц SiO_2 и Al_2O_3 на структуру, свойства и долговечность стекловолоконного эпоксидного полимербетона. Разработана эффективная технология получения наномодифицированных САПБ, включающая ультразвуковое диспергирование наночастиц в эпоксидном связующем. Методами СЭМ/ЭДС подтверждено то, что введение 0,5–1,0 масс. % нано- SiO_2 или нано- Al_2O_3 приводит к целенаправ-

ленному формированию плотного, гомогенного переходного слоя на межфазных границах, устраняя характерные для немодифицированного материала дефекты. Уплотнение межфазной границы напрямую коррелирует с улучшением барьерных свойств композита, что подтверждается данными импедансной спектроскопии (увеличение R_{pr} более чем в 3 раза). Наномодификация обеспечила существенный рост коррозионной стойкости САПБ в модельных средах химических производств. После 180 суток ускоренных испытаний при 40 °С потери прочности при изгибе у лучших наномодифицированных составов не превысили 12–15 %, в то время как контрольный материал утратил 22–42 % прочности. Водопоглощение снизилось на 30–40 %. Выявлена и обоснована химическая специфичность защитного действия наномодификаторов: наночастицы Al_2O_3 проявили максимальную эффективность в кислой среде, а наночастицы SiO_2 – в щелочной, что открывает путь к целенаправленной оптимизации состава ПБ для конкретного типа агрессивной среды. Формирование модифицированных межфазных границ не только привело к повышению исходных механических свойств, но и принципиально изменило характер их деградации при коррозионном старении, демонстрируя кинетику снижения ударной вязкости более пологой и управляемой. Целенаправленное наномодифицирование межфазных границ частицами SiO_2 и Al_2O_3 является высокоэффективной стратегией для создания нового поколения стекловолоконистых полимербетонов с повышенным и прогнозируемым ресурсом долговечности для экстремальных условий эксплуатации в химической, нефтехимической и смежных отраслях промышленности [3].

Таблица

Влияние наномодификации на свойства САПБ после 180 суток
в агрессивных средах ($T = 40\text{ °C}$)

Состав образца	Среда воздействия	Тип образца (количество)	Δm , %	W , %	σ_i после воздействия, МПа	Сохранение σ_i , %
Контроль	10 % H_2SO_4	Балочки (3) / Пластины (3)	–1,85	0,92	24,1	62
	10 % NaOH	Балочки (3) / Пластины (3)	–0,73	1,15	22,8	58
	5 % NaCl	Балочки (3) / Пластины (3)	+0,12	0,68	30,5	78
САПБ-S (1,0 % SiO_2)	10 % H_2SO_4	Балочки (3) / Пластины (3)	–0,95	0,52	30,5	82
	10 % NaOH	Балочки (3) / Пластины (3)	–0,31	0,60	32,8	88
	5 % NaCl	Балочки (3) / Пластины (3)	+0,08	0,41	36,2	86
САПБ-A (1,0 % Al_2O_3)	10 % H_2SO_4	Балочки (3) / Пластины (3)	–0,65	0,48	33,2	88
	10 % NaOH	Балочки (3) / Пластины (3)	–0,52	0,66	29,7	80
	5 % NaCl	Балочки (3) / Пластины (3)	+0,05	0,38	37,1	87

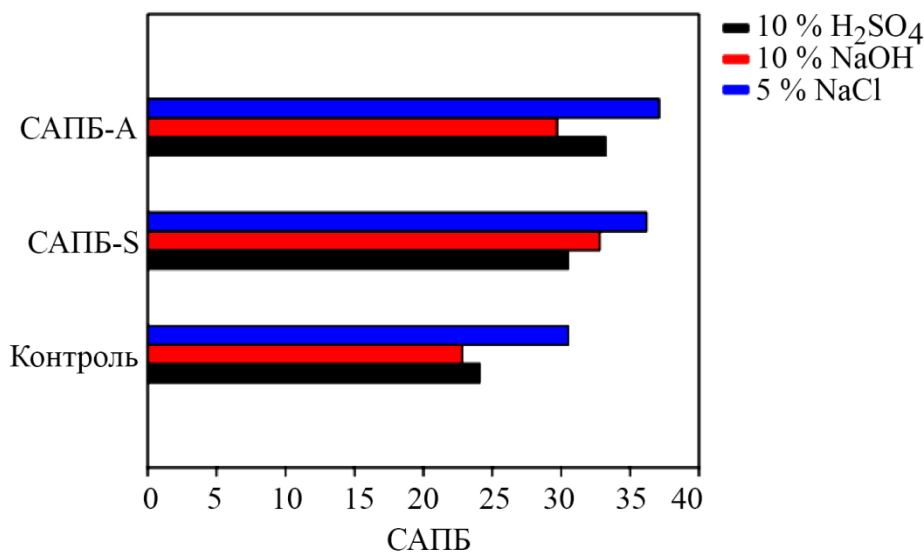


Рис. 2. Изменение предела прочности при изгибе (σ_i) наномодифицированных и контрольных образцов стекловолокнистого полимербетона после 180-суточного коррозионного воздействия в различных средах

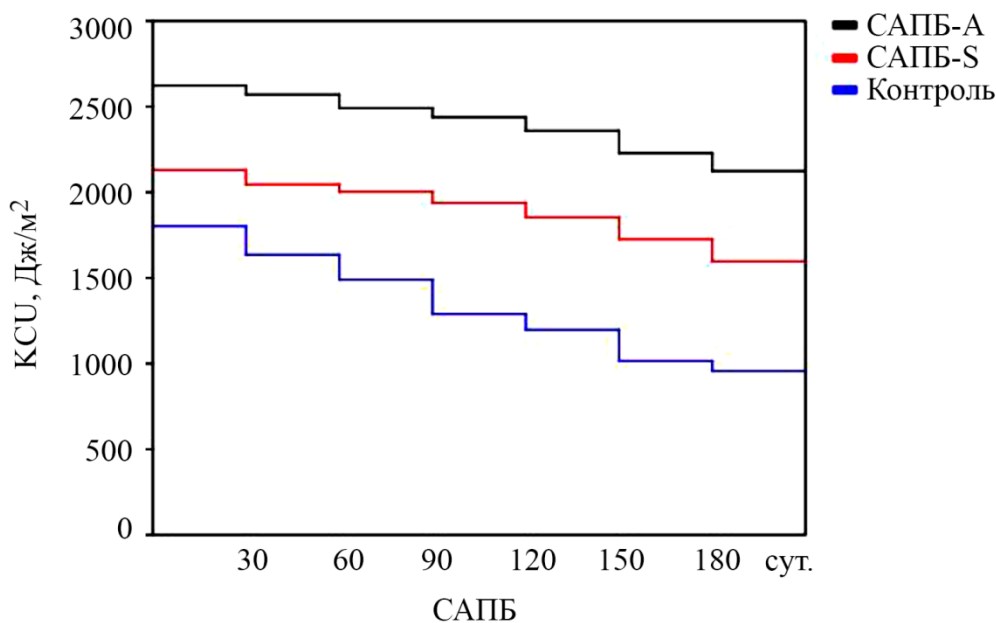


Рис. 3. Динамика изменения ударной вязкости (a_i) стекловолокнистого полимербетона в процессе коррозионного старения в 10-процентном растворе H₂SO₄

Для каждого состава (Контроль, САПБ-S с 0,5 % и 1,0 % SiO₂, САПБ-А с 0,5 % и 1,0 % Al₂O₃) изготавливали по 3 образца-балочки размером 40 × 40 × 160 мм для механических испытаний и по 3 образца-пластины размером 100 × 100 × 10 мм для исследований структуры и коррозионных испытаний в каждой среде (10 % H₂SO₄, 10 % NaOH, 5 % NaCl). Таким образом, для каждого условия экспозиции (среда, срок) испытывали по три параллельных образца каждого типа, что обеспечивало статистическую достоверность результатов.

В таблице, в столбце «Тип образца (количество)», указаны тип и количество параллельных образцов, использованных для определения механических свойств (балочки) и для измерения водопоглощения (пластины). Значения в таблице представляют собой средние арифметические результаты испытаний трех образцов.

4. Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что целенаправленное наномодифицирование межфазных границ в стекловолокнистом эпоксидном полимербетоне частицами SiO_2 и Al_2O_3 является высокоэффективным методом повышения его долговечности в агрессивных средах. Введение 0,5–1,0 масс. % наночастиц приводит к формированию плотного и однородного переходного слоя, что достоверно улучшает барьерные свойства композита, снижает водопоглощение на 30–40 % и значительно замедляет деградацию механических характеристик при длительном воздействии кислот, щелочей и хлоридов.

Выявлена специфичность защитного действия модификаторов в зависимости от pH среды: нано- Al_2O_3 наиболее эффективен в кислых средах, а нано- SiO_2 – в щелочных. Это позволяет целенаправленно проектировать составы полимербетонных с прогнозируемым ресурсом для конкретных условий эксплуатации в химической промышленности.

Таким образом, разработанная технология наномодифицирования открывает путь к созданию нового поколения высокостойких композитных материалов для конструкций, работающих в экстремальных химико-технологических средах.

Литература

1. Mechanical performance and void structure change of foamed cement paste subjected to static and cyclic loading under plane strain conditions / Z. Zhang, F. Rao, G. Ye, J. Liu // *Materials*. – 2022. – Vol. 15 (5). – P. 1711. – DOI: 10.3390/ma15051711.
2. Loginova S., Tanichev M., Kalinin A. Study of corrosion resistance of nanomodified concrete in biologically aggressive environments // *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*. – 2024. – Vol. 14 (4). – P. 217–222. – DOI: 10.31407/ijeess14.426.
3. Сиянов А. И., Ярошевич Д. К. Исследования прочности легкого бетона при различных температурных режимах // *Construction and Geotechnics*. – 2024. – Т. 15 (2). – С. 49–59. – DOI: 10.15593/2224-9826/2024.2.04.
4. Study on preparation and performance of CO_2 foamed concrete for heat insulation and carbon storage / X. Ta, Y. Zhang, Z. Wan, P. Shi, J. Zhou // *Materials*. – 2023. – Vol. 16 (7). – P. 2725. – DOI: 10.3390/ma16072725.
5. Effect of nano-silica dispersed at different temperatures on the properties of cement-based materials / H. Liu, Q. Li, S. Ni, L. Wang, G. Yue, Y. Guo // *Journal of Building Engineering*. – 2022. – Vol. 46. – Art. 103750. – DOI: 10.1016/j.jobee.2021.103750.
6. Padavala S. S. A. B., Ramesh kode V., Dey S. Sustainable concrete development towards the eco-friendly construction: enhancing the strength and durability by using fly ash and silica fume // *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. – 2024. – Vol. 9 (1). – Art. No 50. – DOI: 10.1007/s41024-024-00407-5.
7. Sulfate corrosion resistance of foundation concrete with nano-particles / M. Zhang, D. Ma, J. He, Y. Han // *Magazine of Civil Engineering*. – 2023. – Vol. 119 (3). – 11901. – DOI: 10.34910/MCE.119.1.
8. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: an overview / X. Shi, N. Xie, K. Fortune, J. Gong // *Construction and Building Materials*. – 2012. – Vol. 30. – P. 125–138. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038.
9. A review of concrete exposed to low-temperature environments at early ages: mechanical properties and durability / Y. Wang, Z. Wu, X. Zheng, K. Li, C. Liu // *Journal of Building Engineering*. – 2025. – Vol. 111. – 113122. – DOI: 10.1016/j.jobee.2025.113122.
10. Методы функционального наномодифицирования в разработке и научном обосновании создания лакокрасочных покрытий металлических конструкций мостовых сооружений / М. Х. Искандаров, А. П. Пичугин, А. В. Пчельников, А. К. Туляганов, Т. А. Вагина // *Строи-*

тельные материалы. – 2026. – №№ 1–2. – С. 105–114. – DOI: 10.31659/0585-430X-2026-843-1-2-105-114.

11. Rawat G., Gandhi S., Murthy Y. I. Durability aspects of concrete containing nano-titanium dioxide // *ACI Materials Journal*. – 2023. – Vol. 120 (2). – P. 25–35. – DOI: 10.14359/51738490.

12. Effect of magnetorheological additives on the buildability of 3D concrete printing / S. Kanagasuntharam, S. Ramakrishnan, S. Muthukrishnan, J. Sanjayan // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 74 (1). – 106814. – DOI: 10.1016/j.jobbe.2023.106814.

13. Nigam M., Verma M. Effect of nano-silica on the fresh and mechanical properties of conventional concrete // *Forces in Mechanics*. – 2023. – Vol. 10. – 100165. – DOI: 10.1016/j.finmec.2022.100165.

14. Glass fibers reinforced concrete: overview on mechanical, durability and microstructure analysis / J. Ahmad, R. A. González-Lezcano, A. Majdi, N. Ben Kahla, A. F. Deifalla, M. A. El-Shorbagy // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – P. 5111. – DOI: 10.3390/ma15155111.

15. Feng H., Haoliang W., Dengwu J. Effect of magneto-rheological response on early hydration and microstructure of cement paste // *Construction and Building Materials*. – 2025. – Vol. 474. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141161.

16. Effect of nano-SiO₂ on the microstructure and mechanical properties of concrete under high temperature conditions / P. Brzozowski, J. Strzałkowski, P. Rychtowski, R. Wróbel, B. Tryba, E. Horszczaruk // *Materials (Basel)*. – 2022. – Vol. 15 (1). – DOI: 10.3390/ma15010166.

17. Effect of using nano silica on mechanical properties of normal strength concrete / D. Chekravarty, A. Mallika, P. Sravana, S. Rao // *Materials Today : Proceedings of International Conference on Advances in Materials Science*. – 2022. – Vol. 51. – P. 2573–2578. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.409.

18. Osipov S., Prischepa I. Algorithm of estimation of the degree of porosity homogeneity of foamed concretes by local volumes by X-ray computed tomography method // *Materials*. – 2023. – Vol. 16 (8). – P. 3244. – DOI: 10.3390/ma16083244.

19. Nano-silica-modified concrete: a bibliographic analysis and comprehensive review of material properties / K. Khan, W. Ahmad, M. N. Amin, S. Nazar // *Nanomaterials (Basel)*. – 2022. – Vol. 12 (12). – 1989. – DOI: 10.3390/nano12121989.

20. Брусенцева Т. А. Влияние наночастиц диоксида кремния на механические свойства эпоксидных нанокомпозитов // VIII всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, посвященная 50-летию основания Института химии нефти : тезисы докладов. – Томск : ТГУ, 2019. – С. 267–268. – DOI: 10.17223/9785946218412/178.

21. Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes / M. G. Sohail, R. Kahraman, N. Al Nuaimi, B. Gencturk, W. Alnahhal // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 33. – P. 101669. – DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101669.

22. Multi-functional interface tailoring for enhancing thermal conductivity, flame retardancy and dynamic mechanical property of epoxy/Al₂O₃ composites / Y. Feng, C. He, Y. Wen, X. Zhou, X. Xie, Y. Ye, Y.-W. Mai // *Composites Science and Technology*. – 2018. – Vol. 160. – P. 42–49. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.03.009.

23. Tanimola J. O., Efe S. Recent advances in nano-modified concrete: enhancing durability, strength, and sustainability through nano silica (nS) and nano titanium (nT) incorporation // *Applications in Engineering Science*. – 2024. – Vol. 19. – 100189. – DOI: 10.1016/j.apples.2024.100189.

24. Apostolopoulos C., Koulouris K. Corrosion effects on durability of RC structures // *Metals*. – 2021. – Vol. 11. – P. 1812. – DOI: 10.3390/met11111812.

25. Nanomodified concrete with enhanced characteristics based on river snail shell powder / S. A. Stelmakh, E. M. Shcherban, A. N. Beskopylny, L. R. Mailyan, B. Meskhi, N. Beskopylny, N. Dotsenko, M. Kotenko // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12 (15). – P. 7839. – DOI: 10.3390/app12157839.

26. ГОСТ 10180-2012.

27. Chousidis N., Constantinides G. Fire endurance and corrosion resistance of nano-modified cement mortars exposed to elevated temperatures // *Ceramics International*. – 2023. – Vol. 49 (11), part B. – P. 19182–19193. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.03.044.
28. A review of the effects of nanomaterials on the properties of concrete / Q. Yang, Q. Yang, X. Peng, K. Xia, B. Xu // *Buildings*. – 2025. – Vol. 15 (13). – P. 2363. – DOI: 10.3390/buildings15132363.
29. Influence of nanomaterials on the water absorption and chloride penetration of cement-based concrete / J. A. Abdalla, B. S. Thomas, R. A. Hawileh, K. I. Syed Ahmed Kabeer // *Materials Today : Proceedings*. – 2022. – Vol. 65. – P. 2066–2069. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.06.427.
30. Горбунов С. С. Механические свойства нанокompозитов полимер-неорганических наполнителей : дис. ... д-ра техн. наук. – Москва, 2019. – 320 с.
31. Влияние армирующих частиц B_4C , SiC и Al_2O_3 на физико-механические и трибологические свойства алюминоматричных композитов / С. В. Гладковский, Т. С. Черкасова, Р. А. Саврай, С. В. Петрова // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение*. – 2024. – Т. 26 (2). – С. 48–56. – DOI: 10.15593/2224-9877/2024.2.06.
32. Тонкодисперсная битумная эмульсия для модификации цементного бетона дорожного назначения / А. Р. Гарипов, Д. Б. Макаров, В. Г. Хозин, С. В. Степанов // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. – 2022. – № 3. – С. 85–97. – DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.08.
33. Абдрахимов В. З. Использование металлургических кальций-, алюминий- и железосодержащих шлаков в производстве жаростойкого бетона на основе ортофосфорной кислоты // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. – 2022. – Т. 13 (1). – С. 82–95. – DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.07.
34. Nanomodification of lightweight fiber reinforced concrete with microsilica and its influence on the constructive quality coefficient / E. M. Shcherban, S. A. Stelmakh, A. Beskopylny, L. R. Mailyan, B. Meskhi, V. Varavka // *Materials*. – 2021. – Vol. 14 (23). – P. 7347. – DOI: 10.3390/ma14237347.
35. Guvalov (Kapanakchi) A. A., Abbasova S. İ., Ahmadli N. Z. Nanomodified self-compacting concrete based on recycled aggregates // *Chemical Problems*. – 2025. – Vol. 1 (23). – P. 125–130. – DOI: 10.32737/2221-8688-2025-1-125-130.
36. Tabish M., Zaheer M. M., Baqi A. Effect of nano-silica on mechanical, microstructural and durability properties of cement-based materials: a review // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 65. – 105676. – DOI: 10.1016/j.jobee.2022.105676.
37. Artamonova O., Chernyshov E., Slavcheva G. Factors and mechanisms of nanomodification cement systems in the technological life cycle // *Magazine of Civil Engineering*. – 2022. – Vol. 109 (1). – P. 10906. – DOI: 10.34910/MCE.109.6.