

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.13>**ТВЕРДЕНИЕ ЦЕМЕНТНО-ЗОЛЬНОГО ВЯЖУЩЕГО В ПРИСУТСТВИИ СТРУКТУРООБРАЗУЮЩИХ ДОБАВОК**

Научная статья

Бартеньева Е.А.^{1,*}, Медведев Е.Р.²^{1,2} Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (e.bartenyeva[at]sibstrin.ru)

Аннотация

В статье приводятся результаты исследования кальцийсодержащих силикатных добавок, их влияние на характеристики цементно-золяного вяжущего. Для его получения в данной работе использовалась кислая зола-унос ТЭЦ г. Новосибирска с удельной поверхностью 1100 м²/кг. Установлено увеличение прочности модифицированного вяжущего на 3,5–13% по сравнению с контрольным составом. При проведении электронной микроскопии наблюдается формирование более плотной микроструктуры смешанного вяжущего с волластонитом и диопсидом. Также выявлена более полная гидратация вяжущего с помощью рентгенофазового анализа, на данный процесс сильнее оказывает влияние волластонит. Полученное смешанное вяжущее предполагается использовать в технологии неавтоклавного пенобетона при введении золы в количестве 39% от общего объема.

Ключевые слова: структурообразующие добавки, кислая зола-унос, волластонит, диопсид, цементно-золяное вяжущее, пенобетон.

HARDENING OF CEMENT-ASH BINDER IN THE PRESENCE OF STRUCTURE-FORMING ADDITIVES

Research article

Bartenyeva E.A.^{1,*}, Medvedev Y.R.²^{1,2} Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russian Federation

* Corresponding author (e.bartenyeva[at]sibstrin.ru)

Abstract

The article presents the results of a study of calcium-containing silicate additives and their effect on the characteristics of cement-ash binder. To obtain it, this research used acidic pulverized-fuel ash from the Novosibirsk TPP with a specific surface area of 1100 m²/kg. An increase in the strength of the modified binder by 3.5–13% compared to the control composition was established. Electron microscopy showed the formation of a denser microstructure of the mixed binder with wollastonite and diopside. X-ray phase analysis also revealed more complete hydration of the binder, with wollastonite having a stronger influence on this process. The resulting mixed binder is intended for use in non-autoclaved foam concrete technology, with the addition of ash in an amount of 39% of the total volume.

Keywords: structure-forming additives, acid pulverized-fuel ash, wollastonite, diopside, cement-ash binder, foam concrete.

Введение

Экологическая ситуация в стране требует поиска эффективных мер по снижению воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду. Одним из факторов, оказывающих неблагоприятное влияние на экосистемы, являются золоотвалы ТЭЦ. В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 15 июля 2022 г. № 1557-р утвержден план по повышению объемов утилизации золошлаковых отходов. Одним из эффективных способов переработки зол и шлаков является введение их в состав строительных материалов, в частности в пенобетон. Такие вторичные ресурсы не требуют дополнительной обработки сырья, что обеспечивает снижение стоимости продукции и ресурсосбережение [1], [2], [3]. Однако использование золы-уноса может привести к увеличению усадки при высыхании материала, сорбционной влажности и водопоглощения [4].

Введение фибры в рецептуру пенобетонной смеси увеличивает прочность и снижает капиллярную пористость пенобетонов за счет существенного сокращения периода фазового перехода пенобетонной смеси из вязкого состояния в упругое, предотвращения синерезиса пены и образования оптимальной пористой структуры [5]. Модификация структуры пенобетона наноматериалами (нано-SiO₂, графеноксид, нано-TiO₂, углеродные нановолокна и др.) способствует повышению прочности и трещиностойкости пенобетона, при этом происходит снижение пористости и улучшение микроструктуры за счет дискретного армирования межпорowych перегородок наномодификатором [6], [7]. По такому же механизму работает дисперсный наполнитель — пиролизная сажа, в результате применения которой увеличивается пластическая прочность пенобетонной смеси [3]. Совместное применение минеральных добавок, опоковидного мергеля и золы-уноса, в составе пенобетона способствует образованию низкоосновных гидросиликатов кальция и других новообразований, уплотняющих микроструктуру твердеющей матрицы [8].

Таким образом, применение отходов производств позволяет управлять процессами структурообразования цементного камня и получать композиционные материалы с требуемыми характеристиками [9], [10]. Минеральные добавки близкие по химическому составу клинкерным минералам цемента могут выполнять роль кристаллических

затравок для новообразований [11], [12], что может положительно повлиять на эксплуатационные характеристики пенобетона.

В данной работе проводится исследование влияния кальцийсодержащих силикатных добавок на структурообразование цементно-золяного вяжущего, применяемого для получения неавтоклавного пенобетона.

Методы и принципы исследования

Для приготовления смешанного вяжущего применяли портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н (ООО «Топкинский цемент») с истинной плотностью 3160 кг/м^3 и насыпной — 1056 кг/м^3 . Остаток на сите 008 равен 0,44%, нормальная густота составляет 23%. Химический состав, мас. %: SiO_2 — 19,29; Al_2O_3 — 4,63; Fe_2O_3 — 3,91; CaO — 63,02; MgO — 1,86; K_2O — 0,47; Na_2O — 0,37; SO_3 — 3,98; P_2O_5 — 0,07; TiO_2 — 0,28; MnO — 0,05, ППП — 2,25.

Второй компонент — кислая зола-унос г. Новосибирска от сжигания каменных углей Кузнецкого бассейна (ТЭЦ-4). Истинная плотность золы 2286 кг/м^3 , насыпная — 594 кг/м^3 , удельная поверхность — $1100 \text{ м}^2/\text{кг}$. Химический состав, мас. %: SiO_2 — 44,92; Al_2O_3 — 27,08; Fe_2O_3 — 9,91; CaO — 3,96; MgO — 2,59; K_2O — 1,02; Na_2O — 1,50; SO_3 — 0,77; P_2O_5 — 1,36; TiO_2 — 1,43; MnO — 0,12; BaO — 0,32, ППП — 4,02. В соответствии с классификацией зол по активности исследуемый материал относится к кислым: модуль основности Mo — 0,09, коэффициент качества Kk — 0,75. Такие золы не обладают самостоятельными вяжущими свойствами, но для них характерна пуццолановая активность.

По данным рентгенофазового анализа (рис. 1) в составе золы обнаруживаются кварц (4,26, 3,35, 2,69, 2,21, 2,12, 1,82, 1,69, 1,54, 1,38)· 10^{-1} нм, муллит (5,4, 3,37, 2,88, 2,69, 2,54, 2,21, 2,12, 1,70, 1,52)· 10^{-1} нм, магнетит (2,96, 2,55, 2,21, 1,70, 1,54, 1,47)· 10^{-1} нм и гематит (2,69, 2,52, 2,21, 1,82, 1,70, 1,48)· 10^{-1} нм.

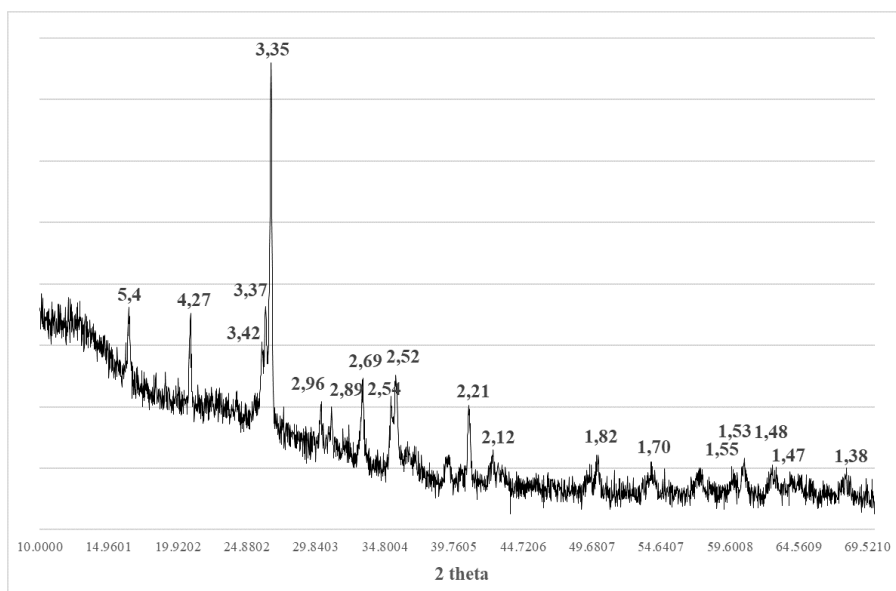


Рисунок 1 - Дифрактограмма кислой золы г. Новосибирска
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.13.1>

Примечание: межплоскостные расстояния указаны в 10^{-1} нм

Основная масса частиц материала находится в пределах 3,6–153 мкм, средний размер — 23 мкм. Исследование морфологии частиц показали, что основная их масса представляет собой сферические образования различного размера. Они обладают в основном закрытой пористостью. Как видно на рисунке 2, в золе просматриваются агрегированные частицы, когда на поверхности более крупных располагаются мелкие микросферы. Это может приводить к увеличению водопотребности смеси.

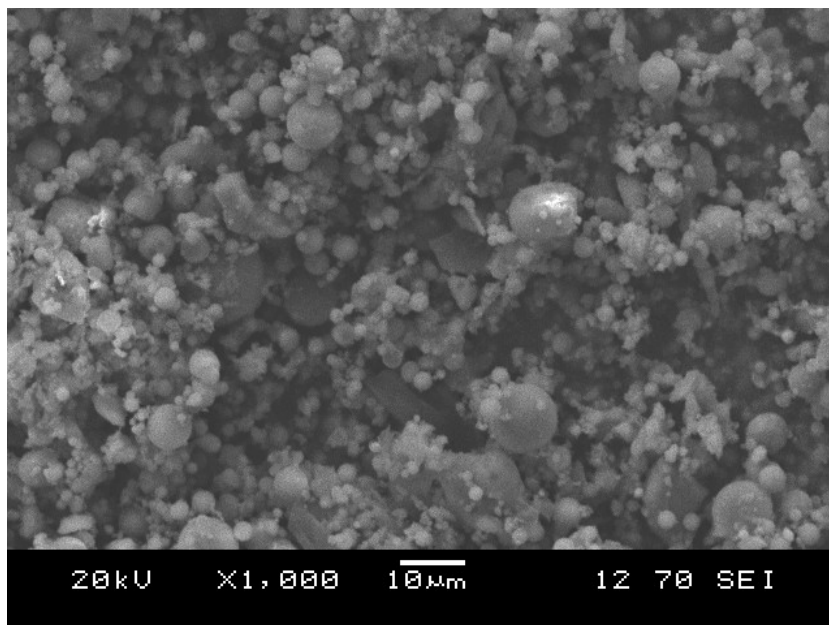


Рисунок 2 - Электронная фотография кислой золы ТЭЦ г. Новосибирска
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.13.2>

Примечание: 1000-кратное увеличение

Введение золы в состав смеси составляет 39% от общего объема.

Применялся диопсид (Слюдянский район Иркутской области) с истинной плотностью 2778 кг/м³ и удельной поверхностью 120 м²/кг и волластонит (Чойский район Республики Алтай) с истинной плотностью 2455 кг/м³ и удельной поверхностью 90 м²/кг. Химический состав диопсида, мас. %: SiO₂ — 51,33; Al₂O₃ — 1,88; Fe₂O₃ — 0,84; CaO — 25,01; MgO — 20,01; K₂O — 0,16; TiO₂ — 0,14; ППП — 0,61. Максимальный размер частиц диопсида 300 мкм, основная масса материала по размерам лежит в пределах 50–150 мкм. Микродефекты на поверхности диопсида будут способствовать более высокой прочности сцепления частиц с цементным камнем. Химический состав волластонита, мас. %: SiO₂ — 46,1; Al₂O₃ — 2,93; Fe₂O₃ — 4,44; CaO — 45,12; MgO — 0,9; ППП — 0,51. Размеры частиц не превышают 500 мкм, основная масса которых находится в пределах 80–250 мкм. По форме волластонит в большей степени представлен игольчатыми, продолговатыми частицами, которые будут участвовать в армировании межпоровых перегородок.

Основные результаты

Для оценки влияния волластонита и диопсида на структурообразование смешанного вяжущего готовились образцы кубы с ребром 2 см и определялась прочность при сжатии на 3, 7, 14 и 28 суток. Результаты испытаний представлены на рисунке 3.

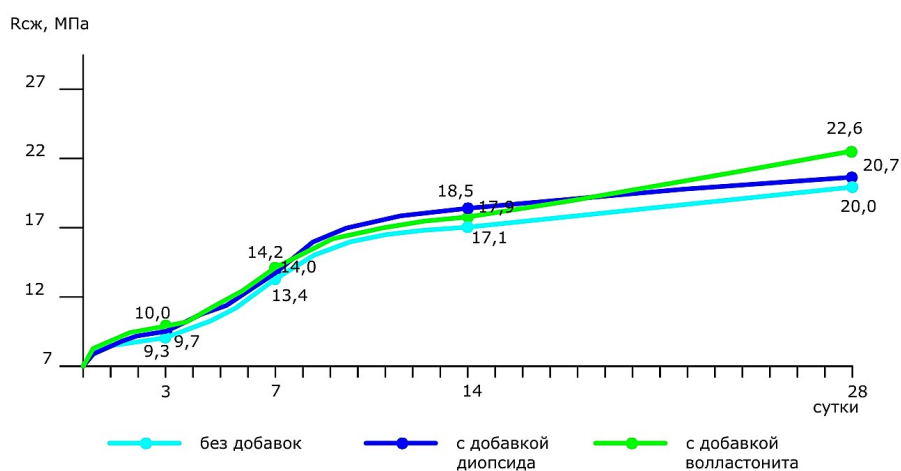


Рисунок 3 - Кинетика твердения цементно-зольного вяжущего
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.13.3>

Анализ результатов экспериментальных данных показал, прочность модифицированного вяжущего выше, чем у контрольного состава (рис. 3). На 28 сутки прочность цементно-зольного вяжущего возрастает на 3,5% при использовании диопсида и на 13% при введении волластонита.

На третьи сутки прочность образцов с добавками выше на 4,3–7,5%, на седьмые сутки 4,5–6% а к 14 суткам прочность увеличивается на 4,7–8,2%

Также можно отметить, что более плотная микроструктура межпоровых перегородок характерна для образцов с минеральными добавками (рис. 4, 5) в отличие от бездобавочного (рис. 6).

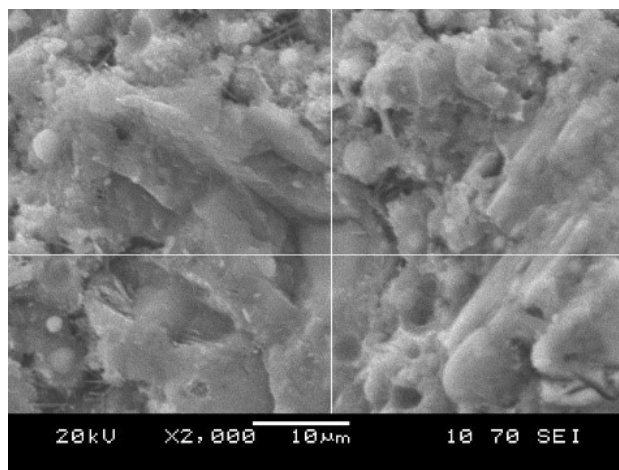


Рисунок 4 - Микроструктура цементно-зольного вяжущего с волластонитом

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.13.4>

Примечание: 2000-кратное увеличение

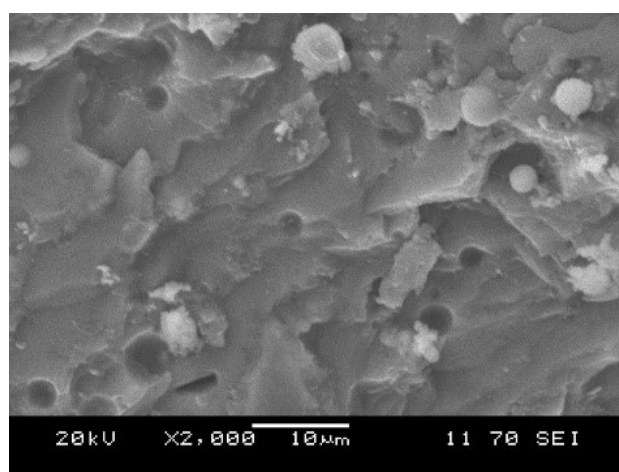


Рисунок 5 - Микроструктура цементно-зольного вяжущего с диопсидом

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.13.5>

Примечание: 2000-кратное увеличение

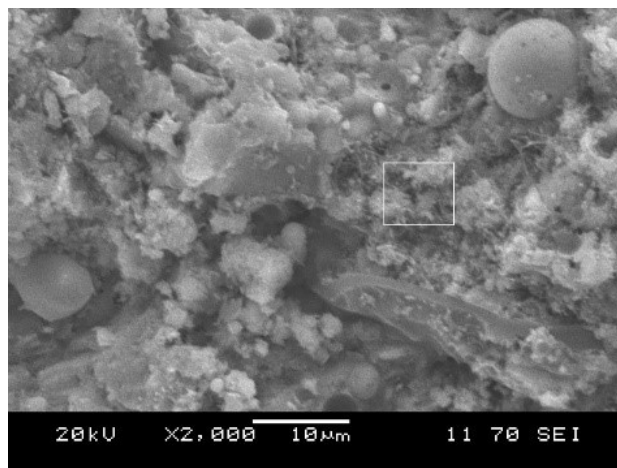


Рисунок 6 - Микроструктура цементно-зольного вяжущего без добавок
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.13.6>

Примечание: 2000-кратное увеличение

По данным рентгенофазового анализа фиксируется увеличение интенсивности рефлексов, соответствующих портландиту ($4,92; 3,11; 2,63; 1,93; 1,80; 1,69$) $\times 10^{-1}$ нм, при введении диопсида и волластонита, что свидетельствует о более полной гидратации вяжущего (рис. 7–9). Причем наибольшая интенсивность наблюдается у образцов с волластонитом (рис. 7), что согласуется с наибольшей прочностью вяжущего с этой добавкой (рис. 3).

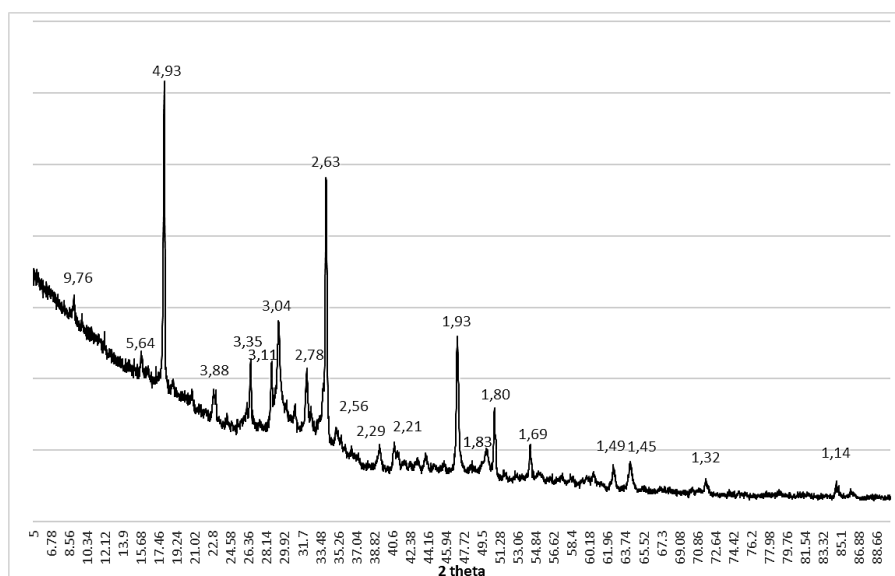


Рисунок 7 - Дифрактограммы цементно-зольного вяжущего с волластонитом
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.13.7>

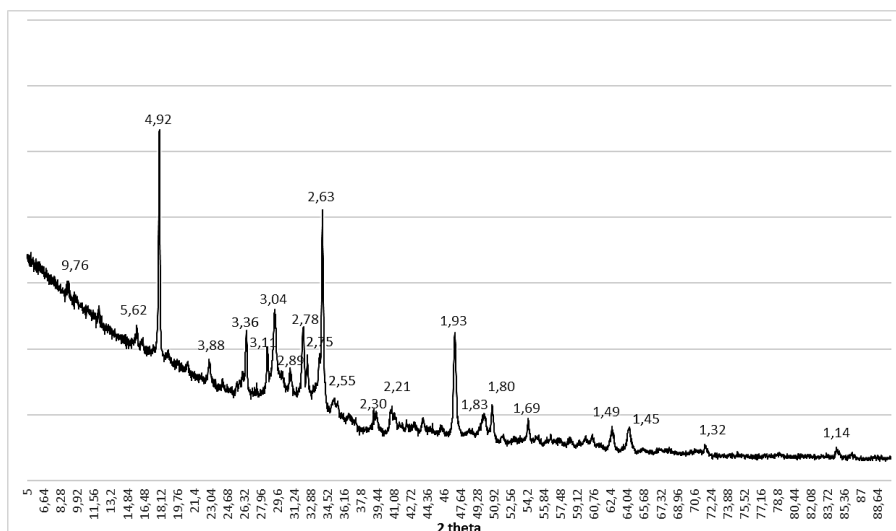


Рисунок 8 - Дифрактограммы цементно-зольного вяжущего с диопсидом
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.13.8>

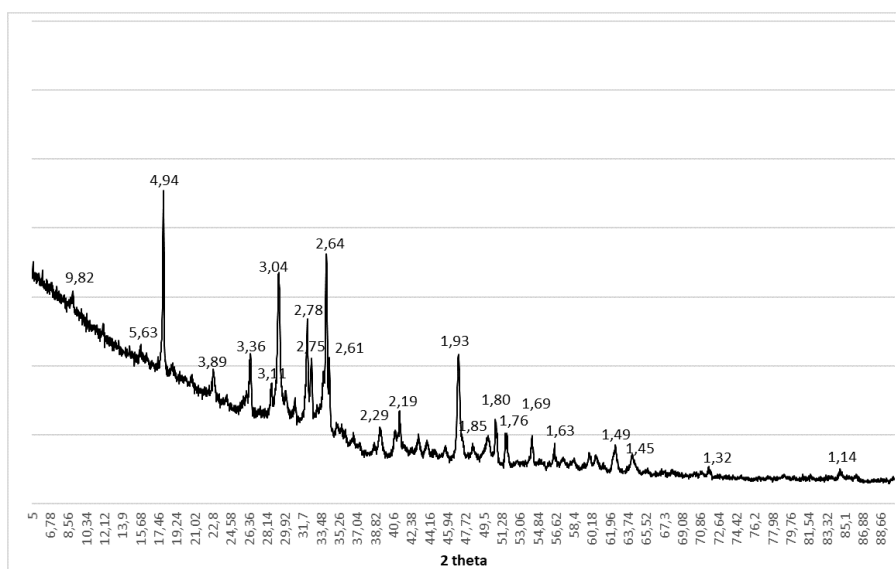


Рисунок 9 - Дифрактограммы цементно-зольного вяжущего без добавок
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.13.9>

Заключение

Таким образом, использование природных кальцийсодержащих силикатных добавок положительно влияет на структурообразование цементного камня: более полно протекает процесс гидратации цемента и образуется более плотная структура. В результате чего увеличивается прочность вяжущего с применением кислой золы-уноса в присутствии диопсида и волластонита на 3,5% и 13% соответственно. Такое смешанное вяжущее с минеральными добавками будет применяться в технологии неавтоклавного пенобетона, что может также привести к улучшению его эксплуатационных характеристик.

Финансирование

Работа выполнялась по гранту Правительства Новосибирской области молодым ученым (Распоряжение Правительства НСО от 03.06.2025 № 234-рп, договор от 06.06.2025 № гр-10-2025-034402).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was carried out under a grant from the Government of the Novosibirsk Region for young scientists (Directive of the Government of the Novosibirsk Region dated 03.06.2025 No. 234-rp, contract dated 06.06.2025 No. gr-10-2025-034402).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Славчева Г.С. Физико-климатическая стойкость пенобетонов на основе техногенного сырья / Г.С. Славчева, Т.К. Буймарова // Вестник инженерной школы дальневосточного федерального университета. — 2020. — № 2 (43). — С. 124–131. — DOI: 10.24866/2227-6858/2020-2-13
2. Танг В.Л. Исследование возможности использования многотоннажных отходов для изготовления пенобетона во Вьетнаме / В.Л. Танг, Д.Л. Фам, Д.Т. Во и др. // Сборник докладов IV Национальной научной конференции "Актуальные проблемы строительной отрасли и образования"; — Москва: МГСУ, 2024. — С. 209–214.
3. Иващенко Ю.Г. Управление структурообразованием дисперсно-армированного пенобетона на макроуровне / Ю.Г. Иващенко, Д.Ю. Багапова, А.В. Страхов // Сборник докладов Международного онлайн-конгресса «Фундаментальные основы строительного материаловедения». — Белгород: БГТУ им. Шухова, 2017. — С. 307–311.
4. Капуста А.С. Опыт использования зольных отходов в пенобетонах / А.С. Капуста, Д.А. Рулев // Сборник докладов международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. — Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2024. — С. 63–67.
5. Моргун В.В. Одностадийная технология пенобетона и её влияние на качество стеновых материалов / В.В. Моргун, Л.В. Моргун, В.В. Нагорский // Инженерный вестник Дона. — 2025. — № 9 (129). — С. 537–552.
6. Shahin N. Study of the influence of nanomaterials on the expansion rate of foam concrete / N. Shahin // Construction economics. — 2025. — № 6. — P. 654–657.
7. Кузнецова И.Н. Основные свойства пенобетона на кварцецементном вяжущем / И.Н. Кузнецова, Р.Б. Курбанова // Вестник Югорского государственного университета. — 2022. — № 3 (66). — С. 63–67. — DOI: 10.18822/byusu20220363-67
8. Воронов В.В. Особенности гидратации и твердения полиминеральных композиционных вяжущих для пенобетонов / В.В. Воронов, Е.С. Глаголев // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. — 2020. — № 1 (71). — С. 122–135.
9. Копаница Н.О. Вторичные ресурсы в производстве композиционных строительных материалов на основе цемента / Н.О. Копаница, О.В. Демьяненко, А.А. Куликова и др. // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — № 10. — С. 49–60. — DOI: 10.18799/24131830/2023/10/4304
10. Лищенко А.Н. Исследование пенобетонов на основе золошлаковых отходов Зуевской ТЭС / А.Н. Лищенко // Современное промышленное и гражданское строительство. — 2024. — № 4. — С. 189–195.
11. Ильина Л.В. Изменение фазового состава минеральной добавки при ее измельчении / Л.В. Ильина, Д.А. Цекарь, А.А. Рудакова // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Качество. Технологии. Инновации». — Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 2025. — С. 75–80.
12. Бартьенева Е.А. Особенности структурообразования ячеистого бетона с кальцийсодержащими силикатными добавками / Е.А. Бартьенева, Л.В. Ильина // Эксперт: теория и практика. — 2024. — № 3 (26). — С. 34–40. — DOI: 10.51608/26867818_2024_3_34

Список литературы на английском языке / References in English

1. Slavcheva G.S. Fiziko-klimaticheskaya stojkost' penobetonov na osnove texnogenno go sy'r'ya [Physical-climatic resistance of foam concrete based on waste aggregates] / G.S. Slavcheva, T.K. Bujmarova // Bulletin of the Engineering School of Far Eastern Federal University. — 2020. — № 2 (43). — P. 124–131. — DOI: 10.24866/2227-6858/2020-2-13 [in Russian]
2. Tang V.L. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya mnogotonnazhny'x otxodov dlya izgotovleniya penobetona vo V'etname [Study on the possibility of using large-scale waste for the production of foam concrete in Vietnam] / V.L. Tang, D.L. Fam, D.T. Vo et al. // Proceedings of the IV National Scientific Conference «Current Issues in the Construction Industry and Education»; — Moscow: MGSU, 2024. — P. 209–214. [in Russian]
3. Ivashchenko Yu.G. Upravlenie strukturoobrazovaniem dispersno-armirovannogo penobetona na makrourovne [Control of Structure Formation in Dispersed-Reinforced Foam Concrete at the Macro Level] / Yu.G. Ivashchenko, D.Yu. Bagapova, A.V. Strakhov // Proceedings of the International Online Congress "Fundamental Principles of Construction Materials Science". — Belgorod: BSTU named after Shukhov, 2017. — P. 307–311. [in Russian]

4. Kapusta A.S. Opit ispolzovaniya zolnikh otkhodov v penobetonakh [Experience of Using Ash Waste in Foam Concrete] / A.S. Kapusta, D.A. Rulev // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of Young Scientists of BSTU named after V.G. Shukhov. — Belgorod: BSTU named after Shukhov, 2024. — P. 63–67. [in Russian]
5. Morgun V.V. Odnostadiinaya tekhnologiya penobetona i yeyo vliyanie na kachestvo stenovikh materialov [One-stage foam concrete technology and its impact on the quality of wall materials] / V.V. Morgun, L.V. Morgun, V.V. Nagorskii // Inzhenernyi vestnik Dona [Engineering Bulletin of Don]. — 2025. — № 9 (129). — P. 537–552. [in Russian]
6. Shahin N. Study of the influence of nanomaterials on the expansion rate of foam concrete / N. Shahin // Construction economics. — 2025. — № 6. — P. 654–657.
7. Kuznecova I.N. Osnovny'e svojstva penobetona na kvarcementnom vyazhushhem [Basic properties of foamconcrete on quartzcement binder] / I.N. Kuznecova, R.B. Kurbanova // Bulletin of Yuga State University. — 2022. — № 3 (66). — P. 63–67. — DOI: 10.18822/byusu20220363-67 [in Russian]
8. Voronov V.V. Osobennosti gidratatsii i tverdeniya polimineral'ny'x kompozitsionny'x vyazhushhix dlya penobetonov [Polymineral composite binders for foam concrete: features of hydration and hardening] / V.V. Voronov, E.S. Glagolev // Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University. — 2020. — № 1 (71). — P. 122–135. [in Russian]
9. Kopanicza N.O. Vtorichny'e resursy' v proizvodstve kompozitsionny'x stroitel'ny'x materialov na osnove cementa [Secondary resources in production of composite building materials based on cement] / N.O. Kopanicza, O.V. Dem'yanenko, A.A. Kulikova et al. // Proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. — 2023. — № 10. — P. 49–60. — DOI: 10.18799/24131830/2023/10/4304 [in Russian]
10. Lishhenko A.N. Issledovanie penobetonov na osnove zoloshlakovy'x otkhodov Zuevskoj TE'S [Investigation of foam concrete based on ash and slag waste of the Zuevskaya TPP] / A.N. Lishhenko // Modern Industrial and Civil Construction. — 2024. — № 4. — P. 189–195. [in Russian]
11. Ilina L.V. Izmenenie fazovogo sostava mineralnoi dobavki pri yee izmelchenii [Change in the phase composition of a mineral additive during its grinding] / L.V. Ilina, D.A. Tsekar, A.A. Rudakova // Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference "Quality. Technology. Innovation". — Novosibirsk: Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 2025. — P. 75–80. [in Russian]
12. Barten'eva E.A. Osobennosti strukturoobrazovaniya yacheistogo betona s kal'cijsoderzhashhimi silikatny'mi dobavkami [Features of the structure formation of cellular concrete with calcium-containing silicate additives] / E.A. Barten'eva, L.V. Il'ina // Expert: Theory and Practice. — 2024. — № 3 (26). — P. 34–40. — DOI: 10.51608/26867818_2024_3_34 [in Russian]