

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС  
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО  
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

DOI 10.51885/1561-4212\_2024\_2\_233  
MPHTI 67.09.05

**А. Аскербекова<sup>1</sup>, Д. Дюсембинов<sup>2</sup>, А. Жумагулова<sup>3</sup>, Р. Лукпанов<sup>4</sup>,  
М. Конканов<sup>5</sup>, А. Джексембаева<sup>6</sup>**

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

<sup>1</sup>E-mail: arai\_09.91@mail.ru

<sup>2</sup>E-mail: dusembinov@mail.ru

<sup>3</sup>E-mail: zaaskarovna@gmail.com\*

<sup>4</sup>E-mail: rauan\_82@mail.ru

<sup>5</sup>E-mail: marcon@metrology.kz

<sup>6</sup>E-mail: dzheksembayeva\_ae@mail.ru

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕНОБЕТОНА  
НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНОЙ ФИБРЫ, ПОЛУЧЕННОЙ ИЗ ОТХОДОВ  
ПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛЬНЫХ УТЕПЛИТЕЛЕЙ**

**МИНЕРАЛДЫ ОҚШАУЛАУ ӨНДІРІСІНІҢ ҚАЛДЫҚТАРЫНАН АЛЫНҒАН  
МИНЕРАЛДЫ ТАЛШЫҚ НЕГІЗІНДЕ КӨБІК БЕТОН ӨНДІРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ**

**TECHNOLOGY OF FOAM CONCRETE PRODUCTION ON THE BASIS OF MINERAL  
FIBER OBTAINED FROM WASTES OF MINERAL INSULATION PRODUCTION**

**Аннотация.** Пенобетон в настоящее время широко применяется в строительстве благодаря ряду преимуществ, таких как экологическая безопасность, отличные теплоизоляционные характеристики и способность поглощать шум. В данной статье проводится исследование двух видов пенобетона: традиционного и с добавлением минеральной фибры, и предлагается технология получения пенобетона на основе отходов производства утеплителей. Используя стандартные методы испытаний, были определены показатели прочности и плотности готовых изделий. Полученные результаты свидетельствуют о равномерной поровой структуре и прочности блоков по всей поверхности. Это указывает на высокое качество материала и его способность эффективно выдерживать нагрузки. При этом использование минеральной фибры в пенобетоне дополнительно улучшает его характеристики, делая материал еще более прочным и устойчивым к воздействию различных факторов. Таким образом, исследование подтверждает эффективность пенобетона в качестве строительного материала и его потенциал для различных применений в строительной индустрии.

**Ключевые слова:** пенобетон, прочность, плотность, поры, минеральная фибра, поровая структура, вяжущее.

**Аңдатпа.** Қазіргі таңда көбік бетон құрылыста экологиялық қауіпсіздік, жоғары жылу оқшаулау өнімділігі және шуды сіңіру қабілеті сияқты бірқатар артықшылықтардың арқасында кеңінен қолданылады. Бұл мақалада көбік бетонының екі түрі зерттеледі: дәстүрлі және минералды талшық қосылған көбік бетондар. Сонымен қатар оқшаулау өндірісінің қалдықтары негізінде көбік бетонын алу технологиясы ұсынылады. Стандартты сынақ әдістерін қолдана отырып, дайын өнімнің беріктігі мен тығыздығының көрсеткіштері анықталды. Нәтижелер бүкіл бетіндегі блоктардың біркелкі кеуекті құрылымы мен беріктігін көрсетеді. Бұл материалдың жоғары сапасын және оның жүктемелерге тиімді төтеп беру қабілетін көрсетеді. Сонымен қатар, көбік бетонында минералды талшықты қолдану оның сипаттамаларын одан әрі жақсартады, бұл материалды одан да берік және әртүрлі факторлардың әсеріне төзімді етеді. Осылайша, зерттеу көбік бетонының құрылыс материалы ретіндегі тиімділігін және оның құрылыс индустриясында әртүрлі қолданбалар үшін өлеуетін растайды.

**Түйін сөздер:** көбік бетон, беріктік, тығыздық, тері тесігі, минералды талшық, кеуек құрылымы, тұтқыр.

**Abstract.** Foamed concrete is now widely used in construction due to a number of advantages such as environmental safety, excellent thermal insulation characteristics and the ability to absorb noise. This paper studies two types of foamed concrete: traditional and with the addition of mineral fiber, and proposes a technology for producing foamed concrete based on insulation waste. Using standard test methods, the strength and density indices of the finished products were determined. The obtained results indicate a uniform pore structure and strength of the blocks over the entire surface. This indicates the high quality of the material and its ability to effectively withstand loads. At the same time, the use of mineral fiber in foam concrete further improves its characteristics, making the material even more durable and resistant to various factors. Thus, the study confirms the effectiveness of foamed concrete as a building material and its potential for various applications in the construction industry.

**Keywords:** foam concrete, strength, density, pores, mineral fiber, pore structure, binder.

*Введение.* С развитием строительной отрасли большое внимание уделяется новым технологиям производства строительных материалов изделий [1].

Легкие бетоны используются в строительстве с давних времен и являются предшественниками современного бетона [2]. Первые образцы легкого бетона были использованы две тысячи лет назад во времена ранней Римской империи. Ярким примером истории возведения сооружений из бетона является Пантеон в Риме, построенный примерно в 128 г.н.э. с использованием природных легких заполнителей в сцепке с вяжущим компонентом. Изделия из ячеистого легкого бетона востребованы в строительстве зданий и сооружений, в отличие от кирпича и монолитного бетонного блока, благодаря относительно легкому весу и высоким теплотехническим показателям. Блоки из ячеистого бетона примерно на 40 % легче обычного керамического кирпича, а больший размер и гладкая поверхность блоков уменьшают количество как упаковочного, так и штукатурного раствора [3]. В строительстве зданий по монолитной технологии активно применяются газобетонные блоки для заполнения ненесущих стен.

Основным фактором при научных разработках является энергоэффективность, физико-механические свойства разрабатываемых материалов и изделий [4-6]. Одним из энергоэффективных и часто применяемых материалов в строительстве жилых зданий является ячеистый бетон [6-8]. Ячеистые бетоны делятся на пено- и газобетоны, у которых имеются определенные недостатки: как правило, для производства газобетона применяют преобразователь – алюминиевую пудру, что обеспечивает образование поровой структуры посредством химической реакции с выделением газа. Однако при относительной стабильности порообразования материал имеет сообщающиеся поры [7-9]. Также для производства газобетона применяют известково-гипсовые вяжущие или едкие компоненты (едкий натрий) для улучшения химической реакции с большим выделением газа. Пенобетон получают путем получения поровой структуры с применением пены. Полученные таким образом поры замкнутые и не сообщающиеся, что является большим преимуществом в процессе эксплуатации материала. Также в пенобетоне не применяются едкие компоненты, что обеспечивает экологическую составляющую в процессе эксплуатации. Основным негативным фактором пенобетона является нестабильность при распределении пор по скелету изделия [10-13].

Целью статьи является исследование качества пенобетона с применением минеральной фибры, полученной из отходов производства минеральных утеплителей.

*Задачи статьи:*

1. Изучение технологии применения минеральной фибры, полученной из отходов производства минеральных утеплителей.

2. Методика исследования физико-механических свойств пенобетона и определение качественной структуры скелета пенобетона.

3. Анализ эффективности применения минеральной фибры, полученной из отходов производства минеральных утеплителей.

*Методы исследования.* Для производства пенобетона с применением минеральной фибры, полученной из отходов производства минеральных утеплителей необходимо учитывать плотность проектируемого пенобетона, а также учитывать процесс подготовки отходов минеральных утеплителей.

При подготовке отходов минеральных утеплителей необходимо учитывать форму отходов [14-16]. Отходы минеральных утеплителей бывают двух видов: отходы с завода по производству минеральных утеплителей и отходы с производства изделий с применением минеральных утеплителей. Отходы с заводов по производству минеральных утеплителей имеют мелкую структуру и могут применяться в производстве пенобетона, отходы производства изделий с применением минеральных утеплителей имеют целостную структуру и требуют механической доработки [17,18].

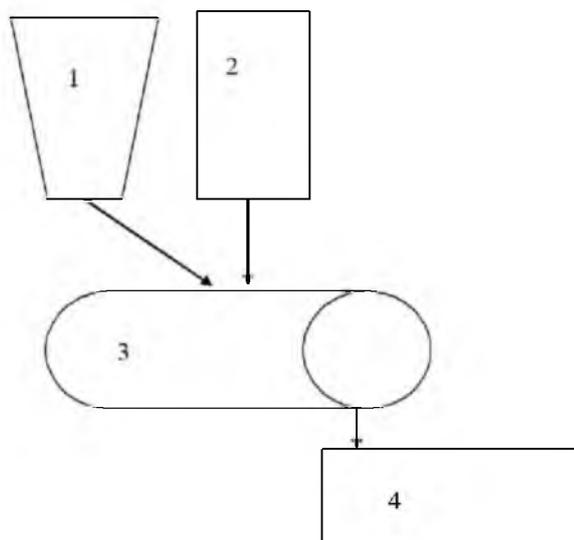
На рис. 1 представлены фото отходов производства минеральных базальтовых утеплителей и фибры, полученной на его основе.



**Рисунок 1.** Отходы производства минеральных базальтовых утеплителей (а) и минеральной фибры (б)

Для проведения механической доработки была разработана схема (рис. 2), согласно которой для получения готовой минеральной фибры необходимо отходы производства минерального утеплителя поместить в смеситель принудительного типа, заполнить его водой, затем перемешивать до полного смачивания отходов. В процессе смачивания волокна будут расслаиваться, создавая отдельные небольшие волокна размерами от 10 до 40 мм. Полученные волокна выгружаются из смесителя через задвижку, так как данная технология разгрузки самая оптимальная. Полученные волокна не требуют полного высушивания, достаточно дать готовому сырью отстояться 2 часа для того, чтобы волокна освободились от излишков воды. Готовую минеральную фибру можно применять для производства пенобетона.

Для анализа качества пенобетона на основе минеральной фибры из отходов минеральных утеплителей были приняты два состава: с минеральной фиброй – тип 2 и контрольный образец – тип 1.



**Рисунок 2.** Схема механической доработки отходов минеральных утеплителей для получения минеральной фибры: 1 – бункер для отходов минеральных утеплителей; 2 – емкость с водой; 3 – смеситель принудительного типа с задвижкой для разгрузки готового сырья; 4 – склад готовой продукции

В табл. 1 представлен состав пенобетона типа 1 и типа 2.

**Таблица 1.** Состав пенобетона марки D 600

№	Состав	Применяемые компоненты				
		Цемент, кг	Песок, кг	Вода, л	Пеноконцентрат, л	Минеральная фибра, кг
1	Тип 1	350	240	150	1,5	–
2	Тип 2	300	270	130	1,5	20

Для определения физико-механических свойств подготовленных образцов типа 1 и типа 2 проводились лабораторные испытания плотности, прочности, морозостойкости.

Для определения плотности пенобетона применялась методика согласно ГОСТ 12730.1-2020 [19]. Объем определялся с помощью штангенциркуля, так как образец (куб) имел правильные геометрические формы 100x100x100 мм. Определялась плотность всех образцов, подготовленных к испытанию на физико-механические показатели.

Плотность определялась по формуле:

$$\rho_w = \frac{m}{V} * 1000, \quad (1)$$

где  $\rho_w$  – плотность материала;  $m$  – масса образца гр.;  $V$  – объем образца см<sup>3</sup>.

Прочность определяли согласно ГОСТ 31359-2007 [20]. Испытания проводили на образцах-кубах 100x100x100 мм.

Морозостойкость определялась согласно ГОСТ 10060-2012 на образцах-кубах 100x100x100 мм, по 12 образцов двух типов [21].

Время заморозки установили на 4 часа при минус 18 С, время оттаивания 4 часа при температуре плюс 18 С и влажности 95 %. Испытания образцов начинали после 15 циклов замораживания и оттаивания с последующим интервалом 25, 35, 50, 75, 100 циклов.

Относительное снижение прочности  $R_{rel}$  в % определяли по формуле:

$$R_{rel} = \left(1 - \frac{\bar{R}_{mtn}}{\bar{R}_{mtk}}\right) * 100, \quad (2)$$

где:  $\bar{R}_{mtn}$  – среднее значение прочности основных образцов после заданных циклов испытаний, МПа;  $\bar{R}_{mtk}$  – среднее значение прочности контрольных образцов, МПа.

Потерю массы  $\Delta_m$  в % рассчитывали по формуле:

$$\Delta_m = \frac{m_n (1-w_n) - \bar{m}_n (1-\bar{w}_n)}{m_n (1-w_n)} * 100, \quad (3)$$

где  $m_n$  – среднее значение массы основных образцов после водонасыщения, гр.;

$w_n$  – среднее значение влажности контрольных образцов в частях от единицы после водонасыщения;

$\bar{m}_n$  – среднее значение массы основных образцов после прохождения промежуточного числа циклов, гр.;

$\bar{w}_n$  – среднее значение влажности основных образцов в частях от единицы после прохождения промежуточного числа циклов.

Все образцы были подготовлены путем выпиливания из целого блока размерами 600x300x400 мм. Возраст образцов 28 суток.

*Результаты исследований.* Испытания на определение плотности пенобетона проводились на всех образцах, подготовленных к испытаниям. Полученные результаты проведенных испытаний на плотность образцов типа 1 и типа 2 представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Фактическая плотность выпиленных образцов пенобетона (проектируемая марка по плотности D600)

№	Состав	Плотность образцов							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Тип 1	550	571	635	698	679	532	581	637
		9	10	11	12	13	14	15	16
		589	578	611	531	624	673	564	672
2	Тип 2	1	2	3	4	5	6	7	8
		598	608	610	604	602	602	593	601
		9	10	11	12	13	14	15	16
		605	609	609	591	612	605	612	588

Согласно результатам, представленным в табл. 2, можно увидеть нестабильную плотность образцов типа 1. Анализ плотности образцов типа 1 показал, что разность между самой низкой плотностью, которая составила 531 кг/м<sup>3</sup>, и самой высокой плотностью 698 кг/м<sup>3</sup> составляет 28 %. Тип 2 показал более качественный результат: разность между самой низкой плотностью, составившей 588 кг/м<sup>3</sup>, и самой высокой, которая составила 612 кг/м<sup>3</sup>, составила 4 %. Таким образом, образец типа 2 показал наиболее стабильную прочность материала в отличие от типа 1.

Испытания прочности проводились на 4 образцах каждого типа: образец с самой низкой плотностью относительно D600, образец, максимально достигший проектируемой плотности со знаком минус, образцы с самой высокой плотностью и образцы, максимально достигшие проектируемой плотности со знаком плюс. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

По результатам проведенных испытаний образцов определено, что образцы пенобетона типа 1 имеют среднюю плотность  $607 \text{ кг/м}^3$  при средней прочности 2,9 МПа. Однако минимальная прочность составила 2,2 МПа, а самая высокая 3,5 МПа. Такое большое расхождение было вызвано большой разницей в плотности между образцами.

**Таблица 3. Прочность пенобетона D600**

№	Состав	Показатели прочности МПа каждого образца и его плотность			
		Плотность/ прочность	Плотность/ прочность	Плотность/ прочность	Плотность/ прочность
1	Тип 1	531/2,2	589/2,9	698/3,5	611/3,1
Средняя плотность и прочность					607/2,9
2	Тип 2	588/4,9	598/5	612/5,8	601/5,2
Средняя плотность и прочность					600/5,2

Образцы типа 2 имели небольшой разрыв между самой высокой плотностью и самой низкой, которая составила  $588 \text{ кг/м}^3$  и  $612 \text{ кг/м}^3$ , и как результат прочность показала стабильное качество при минимальном показателе 4,9 МПа и максимальном 5,8 МПа. Таким образом, пенобетон типа 2 при стабильной плотности показывает стабильную прочность.

Испытания морозостойкости пенобетона типа 1 и типа 2 представлены в табл. 4.

**Таблица 4. Морозостойкость пенобетона D600**

№	Состав	Прочность при сжатии в МПа					
		F15	F25	F35	F50	F75	F100
1	Тип 1	2,9	3,2	1,9			
2	Тип 2	5,3	5,4	5,4	5,3	4,8	2,5

Согласно проведенным испытаниям, образец типа 1 имеет низкую морозостойкость независимо от плотности, образцы начали терять прочность после 35 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Напротив, у образцов типа 2 потеря прочности наступила после 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания, что показывает высокую эффективность образца типа 2.

*Заключение.* Результаты проведенных исследований показали эффективность применения минеральной фибры на основе отходов производства минеральных утеплителей. Минеральная фибра имеет высокую адсорбцию, что обеспечивает сохранение структуры пенобетона в момент его формования. Это явление обусловлено тем, что после формовки минеральная фибра ускоряет процесс схватывания путем адсорбции лишней влаги. Вторым положительным фактором, обеспечивающим высокое качество физико-механических свойств, является минеральное происхождение фибры, так как в процессе гидратации цементное вяжущее образует качественные связи между волокнами. Полученная прочность является стабильной, так как снижается хрупкость материала за счет армирующих свойств минеральной фибры. Увеличение морозостойкости также обеспечивается за счет армированного скелета структуры ячеек пенобетона.

Таким образом, предлагаемая технология производства пенобетона с применением минеральной фибры является эффективной как с точки зрения качества материала, так и с точки зрения экологии.

*Благодарности.* Коллектив авторов выражает благодарность научно-производственному центру «ENU-Lab» Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева за предоставленную лабораторную базу для проведения экспериментальных работ.

Данное исследование финансируется в рамках программно-целевого финансирования Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21882278 «Создание строительного-технического инжинирингового центра по оказанию полного цикла аккредитованных услуг строительного, дорожно-строительного сектора Республики Казахстан»).

#### Список литературы

1. Токаев К.К. Послание Главы государства Касым-Жомарта Токаева народу Казахстана «Экономический курс Справедливого Казахстана». 2023.
2. Бойко В. et al. Исторические очерки строительства дорог и мостов. Litres, 2022. – 227 p.
3. Vijayan D.S. et al. Evaluation of the impact of thermal performance on various building bricks and blocks: A review // *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 23. – P. 101577.
4. Оценка эффективности современных композиционных фасадных систем с тонкими штукатурными слоями и утеплителем из минеральной ваты [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-sovremennyh-kompozitsionnyh-fasadnyh-sistem-s-tonkimi-shtukaturnymi-sloyami-i-uteplitelem-iz-mineralnoy-vaty/viewer> (accessed: 20.03.2024).
5. I.G'.Ahmedov, I.I.Umarov. INSULATION COMPOSITE PLASTER FOR ENERGY-SAVING CONSTRUCTION: 1 // *Journal of new century innovations*. 2023. Vol. 43. – № 1. – P. 281-293.
6. Hafez F.S. et al. Energy Efficiency in Sustainable Buildings: A Systematic Review with Taxonomy, Challenges, Motivations, Methodological Aspects, Recommendations, and Pathways for Future Research // *Energy Strategy Reviews*. 2023. Vol. 45. P. 101013.
7. Shi M. et al. Mix proportion optimization and early strength development in modified foam concrete: an experimental study // *Mater. Res. Express*. IOP Publishing, 2023. Vol. 10, № 6. P. 065507.
8. Baronins J. et al. The Effect of Raw Materials and Mechanical Activation Stages on Properties of Foamed Concrete: SSRN Scholarly Paper 4728421. Rochester, NY, 2024.
9. Zhang X. et al. Effects of different control methods on the mechanical and thermal properties of ultra-light foamed concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262. – P. 120082.
10. Экологичность конструкционных строительных материалов [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologichnost-konstruksionnyh-stroitelnyh-materialov/viewer> (accessed: 20.03.2024).
11. Dhasindrakrishna K. et al. Collapse of fresh foam concrete: Mechanisms and influencing parameters // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 122. – P. 104151.
12. Zhao Z., Zhou X.-P. Digital analysis for pore-scale compressive strength and permeability of foamed cement with realistic microstructures by X-ray- $\mu$ CT imaging // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 346. P. 128456.
13. Jin L. et al. Characterizing the foam-shell microstructure of industrial ultra-light foamed concrete cast under different temperatures // *Materials Characterization*. 2021. Vol. 173. – P. 110938.
14. Yap Z.S. et al. Waste Mineral Wool and Its Opportunities – A Review: 19 // *Materials*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. Vol. 14, № 19. – P. 5777.
15. Yang S. et al. A sustainable foamed material preparation via ettringite-targeted mineral transition of industrial solid wastes // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 375. – P. 134029.
16. dos Reis G.S. et al. Fabrication, microstructure, and properties of fired clay bricks using construction and demolition waste sludge as the main additive // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 258. P. 120733.
17. Неорганические термopenосиликатные материалы на основе минерального и техногенного сырья Кольского полуострова [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neorganicheskie-termopenosilikatnye-materialy-na-osnove-mineralnogo-i-tehnogennogo-syrya-kolskogo-poluostrova/viewer> (accessed: 20.03.2024).
18. Цховребов Э.С. О мерах повышения уровня ресурсосбережения с учётом снижения экологической опасности отходов в строительстве и городском хозяйстве: 1(21) // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии»*. 2022. № 1(21). – P. 83-96.
19. ГОСТ 12730.1-2020 «Бетоны. Методы определения плотности» (с поправкой) [Electronic resource]. URL: [https://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=35437080](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=35437080) (accessed: 20.03.2024).
20. ГОСТ 31359-2007 «Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия» [Electronic resource] // Информационная система ПАРАГРАФ. URL: [https://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=30397436](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30397436) (accessed: 20.03.2024).

21. ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» (поправка) (изм. 1) [Electronic resource] // Информационная система ПАРАГРАФ. URL: [https://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=31521910](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31521910) (accessed: 20.03.2024).

## References

1. Tokaev K.K. Poslanie Glavy gosudarstva Kasym-Zhomarta Tokaeva narodu Kazakhstana «Ehkonomicheskij kurs Spravedlivogo KazakhstanA». 2023.
  2. Bojko V. et al. Istoricheskie ocherki stroitel'stva dorog i mostov. Litres, 2022. – 227 p.
  3. Vijayan D.S. et al. Evaluation of the impact of the thermal performance on various building bricks and blocks: A review // *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 23. P. 101577.
  4. Ocenka ehffektivnosti sovremennykh kompozicionnykh fasadnykh sistem s tonkimi shtukaturnymi sloyami i uteplitelem iz mineral'noj vaty [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ehffektivnosti-sovremennykh-kompozitsionnykh-fasadnykh-sistem-s-tonkimi-shtukaturnymi-sloyami-i-uteplitelem-iz-mineralnoy-vaty/viewer> (accessed: 20.03.2024).
  5. I.G. Ahmedov, I.I. Umarov. INSULATION COMPOSITE PLASTER FOR ENERGY-SAVING CONSTRUCTION: 1 // *Journal of new century innovations*. 2023. Vol. 43, № 1. P. 281–293.
  6. Hafez F.S. et al. Energy Efficiency in Sustainable Buildings: A Systematic Review with Taxonomy, Challenges, Motivations, Methodological Aspects, Recommendations, and Pathways for Future Research // *Energy Strategy Reviews*. 2023. Vol. 45. P. 101013.
  7. Shi M. et al. Mix proportion optimization and early strength development in modified foam concrete: an experimental study // *Mater. Res. Express*. IOP Publishing, 2023. Vol. 10, № 6. P. 065507.
  8. Baronins J. et al. The Effect of Raw Materials and Mechanical Activation Stages on Properties of Foamed Concrete: SSRN Scholarly Paper 4728421. Rochester, NY, 2024.
  9. Zhang X. et al. Effects of different control methods on the mechanical and thermal properties of ultra-light foamed concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262. P. 120082.
  10. Ehkologichnost' konstrukcionnykh stroitel'nykh materialov [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ehkologichnost-konstrukcionnykh-stroitelnykh-materialov/viewer> (accessed: 20.03.2024).
  11. Dhasindrakrishna K. et al. Collapse of fresh foam concrete: Mechanisms and influencing parameters // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 122. P. 104151.
  12. Zhao Z., Zhou X.-P. Digital analysis for pore-scale compressive strength and permeability of foamed cement with realistic microstructures by X-ray- $\mu$ CT imaging // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 346. P. 128456.
  13. Jin L. et al. Characterizing the foam-shell microstructure of industrial ultra-light foamed concrete cast under different temperatures // *Materials Characterization*. 2021. Vol. 173. P. 110938.
  14. Yap Z.S. et al. Waste Mineral Wool and Its Opportunities – A Review: 19 // *Materials*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. Vol. 14, № 19. P. 5777.
  15. Yang S. et al. A sustainable foamed material preparation via ettringite-targeted mineral transition of industrial solid wastes // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 375. P. 134029.
  16. dos Reis G.S. et al. Fabrication, microstructure, and properties of fired clay bricks using construction and demolition waste sludge as the main additive // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 258. P. 120733.
  17. Neorganicheskie termopenosilikatnye materialy na osnove mineral'nogo i tekhnogennogo syr'ya Kol'skogo poluostrova [Electronic resource]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neorganicheskie-termopenosilikatnye-materialy-na-osnove-mineralnogo-i-tehnogennogo-syr'ya-kolskogo-poluostrova/viewer> (accessed: 20.03.2024).
  18. Kkhovrebov E.H.S. O merakh povysheniya urovnya resursosberezheniya s uchotom snizheniya ehkologicheskoy opasnosti otkhodov v stroitel'stve i gorodskom khozyajstve: 1(21) // *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Materialy. Konstrukcii. Tekhnologii»*. 2022. № 1(21). P. 83–96.
  19. ГОСТ 12730.1-2020 «Бетоны. Методы определения плотности» (с поправкой) [Electronic resource]. URL: [https://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=35437080](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=35437080) (accessed: 20.03.2024).
  20. ГОСТ 31359-2007 «Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия» [Electronic resource] // Информационная система ПАРАГРАФ. URL: [https://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=30397436](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30397436) (accessed: 20.03.2024).
  21. ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» (поправка) (изм. 1) [Electronic resource] // Информационная система ПАРАГРАФ. URL: [https://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=31521910](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31521910) (accessed: 20.03.2024).
- 
-