

УДК 691.335

© А. И. Панченко, д-р техн. наук, профессор
© В. А. Михайлов, аспирант
(Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет,
Москва, Россия)
E-mail: intra-baup@list.ru, www.inanac@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-3-71-78

© A. I. Panchenko, Dr. Sci. Tech., Professor
© V. A. Mikhailov, post-graduate student
(National Research Moscow
State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia)
E-mail: intra-baup@list.ru, www.inanac@mail.ru

ПЕНОСТЕКЛОБЕТОН С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ГИПСОВЫМ ВЯЖУЩИМ: СВОЙСТВА, ТЕХНОЛОГИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ

FOAM GLASS CONCRETE WITH MODIFIED GYPSUM BINDER: PROPERTIES, TECHNOLOGY AND APPLICATION

Рассматривается разработка нового композитного материала для стеновых конструкций — пеностеклобетона с модифицированным гипсовым вяжущим. Данный материал сочетает в себе преимущества пеностекла и бетона, такие как низкая удельная масса, высокая прочность, стойкость к атмосферным воздействиям и экологическая безвредность. Для улучшения долговечности и теплопроводности материала предлагается заменить цемент на модифицированное гипсовое вяжущее. Также определяется оптимальный способ приготовления смеси и твердения материала. Показано, что пеностеклобетон с модифицированным гипсовым вяжущим имеет высокий коэффициент размягчения и не подвержен щелочно-кремнеземной коррозии.

Ключевые слова: пеностеклобетон, модифицированное гипсовое вяжущее, щелочно-кремнеземная коррозия, коэффициент размягчения, гранулированное пеностекло.

The paper considers the development of a new composite material for wall structures, namely, foam glass concrete with modified gypsum binder. This material combines the advantages of cellular glass and concrete, such as low specific weight, high strength, resistance to weathering and environmental friendliness. To improve the durability and thermal conductivity of the material, it is proposed to replace cement with a modified gypsum binder. The optimal method of mixture preparation and hardening of the material is also determined. It is shown that foam glass concrete with modified gypsum binder has a high softening coefficient and is not subject to alkali-silica corrosion.

Keywords: foam glass concrete, modified gypsum binder, alkaline-silica corrosion, softening coefficient, granulated expanded glass.

Введение

Ограждающие конструкции не только несут нагрузки, но и защищают от тепловых, акустических и других воздействий окружающей среды, поэтому к стеновым материалам предъявляются требования прочности, сопротивления теплопередаче, долговечности и экологической безопасности. Современные стеновые материалы не всегда могут соответствовать всем этим требованиям одновременно. Для решения обозначенной проблемы авторами статьи предлагается для стеновых конструкций использовать

пеностеклобетон, в связи с чем возникает потребность изучения его свойств и технологии изготовления.

Пеностеклобетон — это композитный материал, который сочетает в себе свойства, отвечающие требованиям, предъявляемым к стеновым конструкциям. Этот материал объединяет преимущества пеностекла и бетона, такие как низкая удельная масса, достаточно высокая прочность, стойкость к атмосферным воздействиям и экологическая безопасность [1, 2]. В состав пеностеклобетона входят вяжущее и гранулированное пено-

стекло, которое служит заполнителем [3, 4]. Коэффициент конструктивного качества (удельная прочность), высокими значениями которого характеризуется пеностеклобетон, оценивается как отношение прочности материала к его средней плотности [5, 6].

Однако при использовании цементного вяжущего возникает проблема недолговечности материала, связанная с высокой вероятностью развития щелочно-кремнеземистой коррозии [7, 8], которая разрушает гранулированное пеностекло. Эта коррозия происходит из-за реакции между аморфным диоксидом кремния (SiO_2), основным компонентом пеностекла, и гидроксидами калия и натрия (NaOH и KOH), содержащимися в цементе [9, 10]. К тому же цемент не раскрывает свой потенциал в конструктивно-теплоизоляционных материалах, так как для наружных стен не нужна высокая прочность, которой обладает цементное вяжущее.

Материалы и методы

Для изготовления образцов пеностеклобетона с модифицированным гипсовым вяжущим (МГВ) использовались следующие материалы:

- гранулированное пеностекло, три фракции с диаметром гранул 2–4 мм, 4–8 мм, 8–16 мм;
- гипсовое вяжущее марки Г-5, Г-7, Г-16, Г-19, Г-25;
- аморфный кремнезем (с содержанием SiO_2 92 %);
- известь (с содержанием $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 86 %);
- вода.

Для изучения свойств пеностеклобетона с модифицированным гипсовым вяжущим использовались следующие методы:

- определение прочности на сжатие по ГОСТ 10180–2012 на образцах-балочках;
- определение коэффициента размягчения по ТУ 21-0284757-1–90 (коэффициент размягчения материала — это отношение прочности материала, насыщенного водой, к прочности материала в сухом состоянии).

Этот коэффициент характеризует водостойкость материала и находится в диапазоне от 0 до 1. Материал считается водостойким, если его коэффициент размягчения не меньше 0,8);

- определение реакционной способности ускоренным методом, описанным в ГОСТ 8269.0–97, на образцах-балочках размером 25×25×254 мм (размер гранул заполнителя — до 5 мм), которые погружались в одномолярный раствор гидроксида натрия с температурой (80 ± 1) °С, и каждые 24 часа измерялась деформация в течение 14 суток.

Результаты и обсуждение

В связи с вышеописанными недостатками цемента в роли вяжущего и для улучшения характеристик пеностеклобетона авторами статьи предлагается заменить цемент на гипсовое вяжущее, что позволяет реализовать его преимущества как вяжущего и избавиться от щелочей NaOH и KOH , что в итоге повысит долговечность, снизит теплопроводность и улучшит экологическую безопасность материала. В то же время гипс имеет свои определенные недостатки, в частности недостаточную водостойкость для наружных стен [11, 12]. Для решения этой проблемы предлагается добавить в состав пеностеклобетона аморфный кремнезем и известь, при реакции которых образуются гидросиликаты кальция, увеличивающие водостойкость материала [13, 14]. Кроме того, известь будет реагировать с аморфным кремнеземом по поверхности гранул пеностекла и образовывать гидросиликаты [15, 16] на границе контактной зоны, улучшая сцепление между гранулами и вяжущим.

Для определения оптимального состава были изготовлены образцы-балочки с разным соотношением аморфного кремнезема и извести $\text{SiO}_2/\text{Ca}(\text{OH})_2$ и определен коэффициент размягчения материала (рис. 1).

Таким образом, установлено, что оптимальное соотношение $\text{SiO}_2/\text{Ca}(\text{OH})_2$ равно 1,2, при этом коэффициент размягчения со-

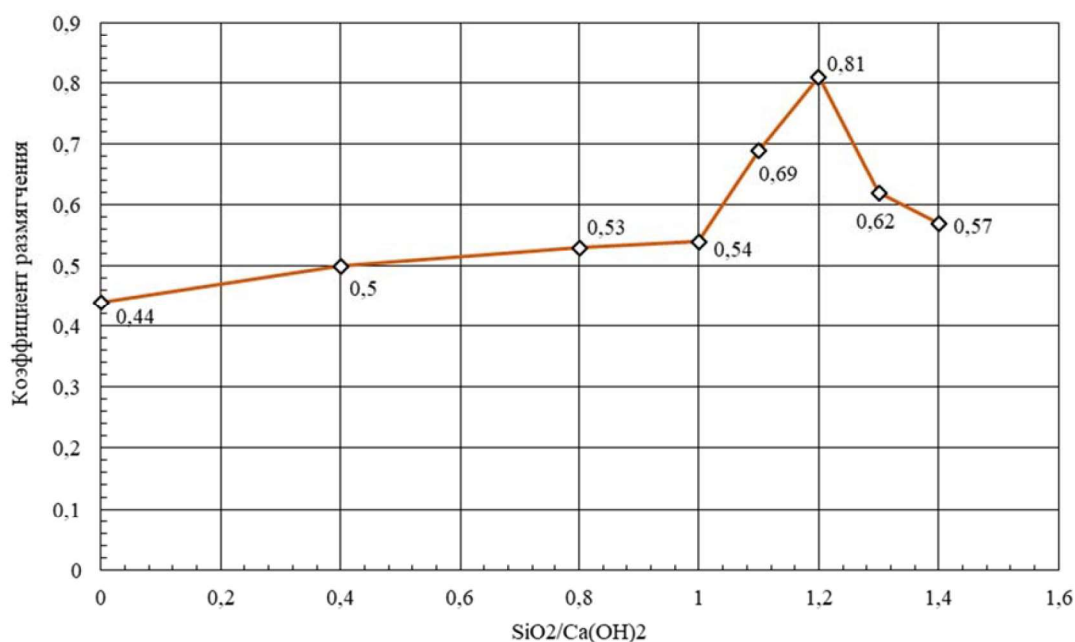


Рис. 1. Зависимость коэффициента размягчения от соотношения SiO₂/Ca(OH)₂

ставляет 0,81, что свидетельствует о высоких показателях водостойкости материала и позволяет применять его для производства наружных стен.

Проверка образцов на реакционную способность (рис. 2) проводилась по

ускоренной методике¹ [17], описанной в ГОСТ 8269.0–97.

¹ Evaluation of Alkali Silica Reactivity (ASR) Mortar Bar Testing (ASTM C1260 and C1567) at 14 days and 28 days. URL: https://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/durability/is549 (14.10.2023).

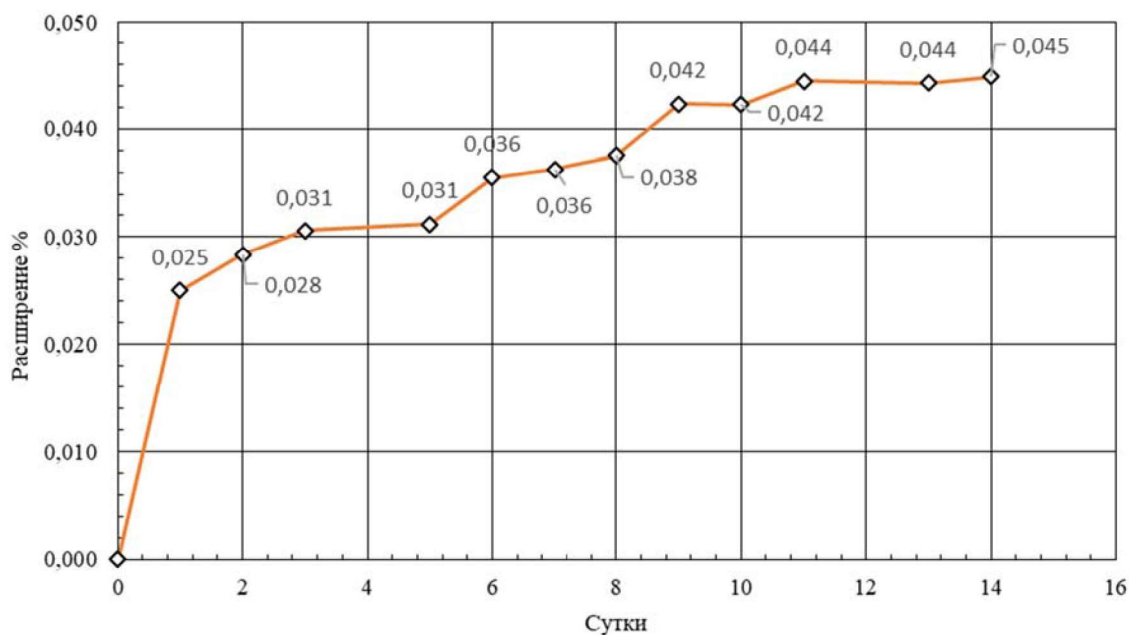


Рис. 2. Расширение балочек из гранулированного пеностекла и модифицированного гипсового вяжущего

В результате исследования установлено, что расширение МГВ с пеностеклом не превышает 0,1% , что свидетельствует о том, что материал не подвержен щелочно-кремнеземистой коррозии [18, 19].

Также изучен вопрос оптимального приготовления смеси пеностеклобетона, для чего были изготовлены шесть партий образцов-балочек с различными способами приготовления смеси (рис. 3), которые твердели в камере тепловлажностной обработки при температуре 60 °С в течение суток и затем испытывались на сжатие.

В рамках экспериментального исследования было проведено сравнение шести методов приготовления пеностеклобетона с использованием в качестве связующего вещества гипса марки Г-7. Описание процедур каждого метода представлено ниже.

1. Метод смешивания компонентов с последующим добавлением воды и пеностекла:

1.1. Осуществлялось соединение гипса, аморфного диоксида кремния и извести с гранулами пеностекла.

1.2. Далее производилось добавление воды и перемешивание состава.

2. Метод последовательного добавления воды, вяжущего и пеностекла:

2.1. В воду вносилась предварительно подготовленная смесь вяжущего.

2.2. Осуществлялось перемешивание.

2.3. В заключение добавлялись гранулы пеностекла.

3. Метод введения предварительно подготовленной смеси вяжущего и пеностекла в воду:

3.1. Перемешивались компоненты вяжущего совместно с гранулированным пеностеклом.

3.2. Далее производилось добавление воды и перемешивание состава.

4. Метод добавления воды и пеностекла с последующим введением связующего:

4.1. В воду вводились гранулы пеностекла, за которыми следовало добавление связующего.

5. Метод использования предварительно выдержанной смеси вяжущего и пеностекла:

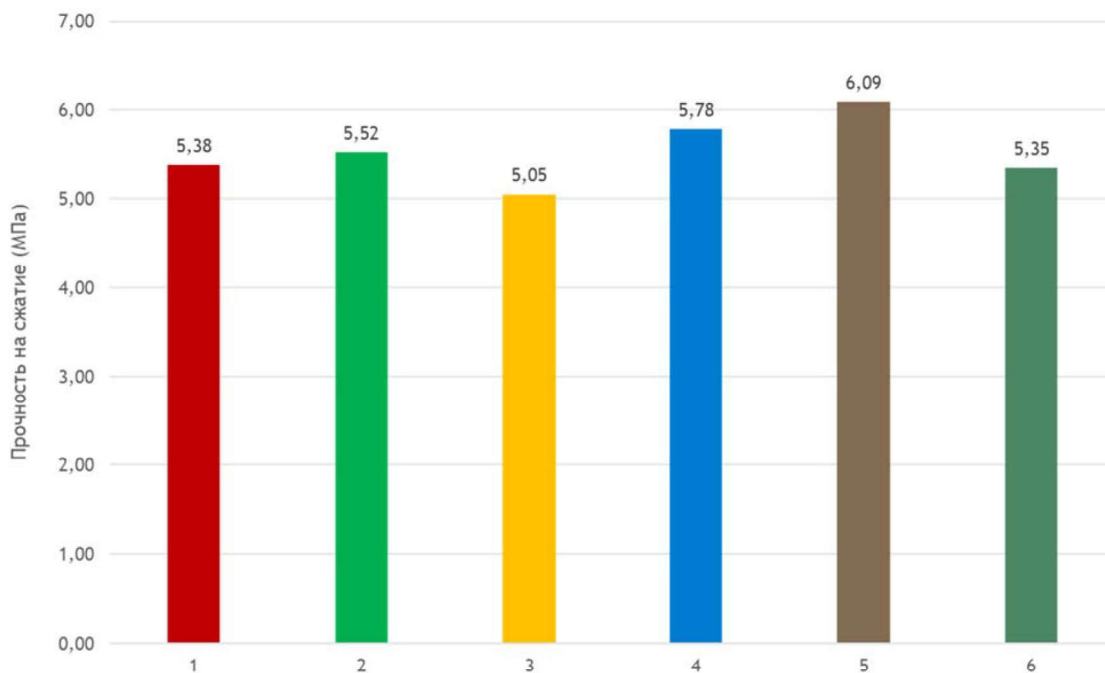


Рис. 3. Зависимость прочности на сжатие от способа приготовления смеси

5.1. Смесь микрокремнезема и извести выдерживалась в течение 30 минут.

5.2. Затем в смесь добавлялся гипс.

5.3. После этого смесь вводилась в воду.

5.4. В конце добавлялись гранулы пеностекла.

6. Метод растворения аморфного диоксида кремния и извести в воде с последующим добавлением гипса и пеностекла:

6.1. Аморфный диоксид кремния и известь растворялись в воде.

6.2. После добавления гипса производилось перемешивание.

6.3. В заключение вводились гранулы пеностекла.

Кроме этого, были изучены четыре способа твердения пеностеклобетона: нормальные условия (НУ); естественные условия (ЕУ); тепловлажностная обработка при 60 °С (ТВО); тепловлажностная обработка при 60 °С в течение суток и далее естественные условия (ТВОЗ) (рис. 4).

Из результатов данного исследования видно, что твердение происходит быстро и при твердении в камере ТВО достаточно

одних суток при температуре 60 °С, а дальнейшее нахождение образцов в ТВО нецелесообразно.

Помимо описанных выше свойств пеностеклобетона, для него характерны показатели средней плотности, теплопроводности и морозостойкости, которые влияют на общие характеристики стеновых конструкций, изготавливаемых из пеностеклобетона (таблица).

Выводы

1. Оптимальное соотношение добавок $\text{SiO}_2/\text{Ca}(\text{OH})_2$ равно 1,2, при этом коэффициент размягчения составляет 0,81, что свидетельствует о высоких показателях водостойкости материала.

2. Пеностеклобетон с МГВ не подвержен щелочно-кремнеземной коррозии, так как в его составе нет цемента, а аморфный кремнезем и известь реагируют между собой и с поверхностью пеностекольных гранул, образуя гидросиликаты.

3. Оптимальный метод использования предварительно выдержанной смеси вяжущего и пеностекла заключается в том, чтобы

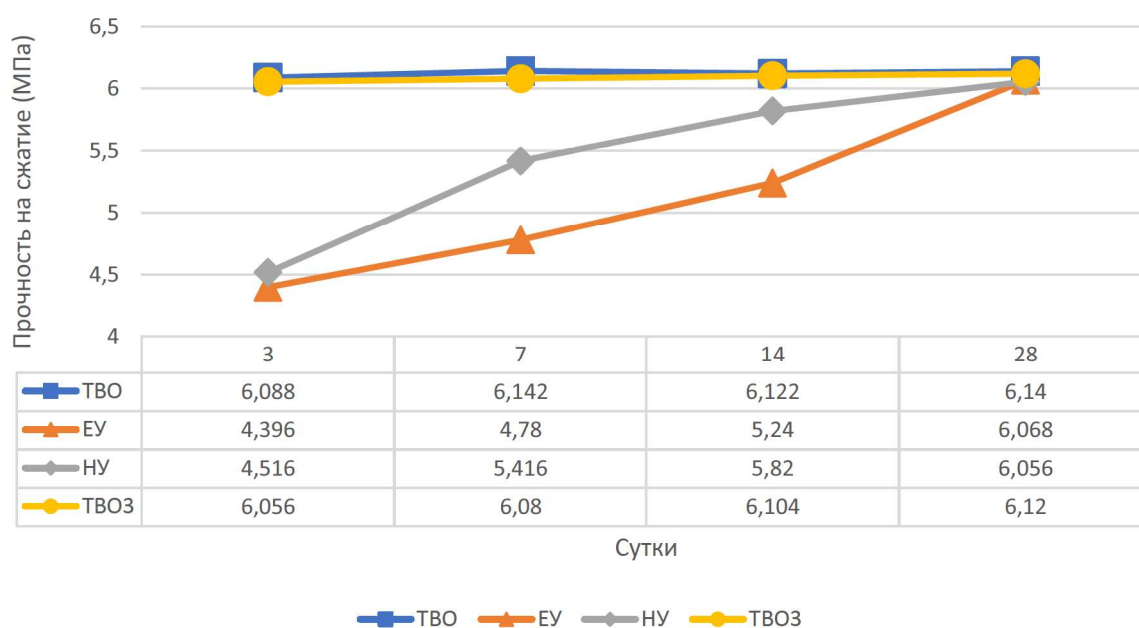


Рис. 4. Кинетика набора прочности на сжатие при различных способах твердения

Основные характеристики пеностеклобетона в зависимости от марки гипса

Вяжущее	Характеристики					
	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на изгиб, МПа	Водопоглощение по массе, %	Средняя плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности Вт/(м ² ·К)	Марка по морозостойкости
МГВ на основе Г5	3,7	0,5	27,07	739,46	0,148	F25
МГВ на основе Г7	6,1	0,5	15,01	741,57	0,156	F25
МГВ на основе Г16	8,7	0,7	9,17	770,35	0,193	F35
МГВ на основе Г19	9,4	0,7	5,90	790,18	0,206	F35
МГВ на основе Г25	11,9	0,9	2,65	826,43	0,217	F50

в воду добавлять заранее смешанный аморфный кремнезем с известью, которые были перемешаны и выдержаны в течение 30 минут вместе с гипсом, а затем добавлять гранулы пеностекла.

4. Оптимальным способом твердения пеностеклобетона на основе МГВ является тепловлажностная обработка при температуре 60 °С или твердение в нормальных условиях на протяжении 2–3 недель.

Библиографический список

1. Орлов А. Д. Гранулированная пеностеклокерамика как перспективный наполнитель для нового поколения энергоэффективных бетонов // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 12. С. 13–15.

2. Сопегин Г. В., Семейных Н. С. Влияние молотого фракционированного пеностекла на свойства гипсового вяжущего и сухих строительных смесей // Молодые ученые — развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2020. № 1. С. 626–629.

3. Закревская Л. В., Попов М. Ю. Легкие бетоны на основе гранулированного пеностекла // Архитектура. Строительство. Образование. 2015. № 1 (5). С. 26–31.

4. Hameed A. M., Hamada R. F. Using The Glass and Rubber Waste as Sustainable Materials to Prepare Foamed Concrete with Improved Properties // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 881. 012188. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/881/1/012188>

5. Ильина Л. В., Тацки Л. Н., Молодин В. В., Колесова Т. Д. Легкие бетоны с пеностеклокристаллическим наполнителем, модифицированные микро- и нано-

кремнеземом // Эксперт: теория и практика. 2023. № 3 (22). С. 80–85.

6. Кетов Ю. А., Словигов С. В. Синтактические полимерные композиционные материалы высоконаполненные гранулированным пеностеклом // Computational nanotechnology. 2019. Т. 6, № 3. С. 39–46.

7. Маневич В. Е., Субботин П. К. Проблемы взаимодействия силикатных наполнителей с цементом // Техника и технология силикатов. 2013. Т. 20, № 2. С. 2–7.

8. Chunhua L., Senzhuang B., Yulong Z., Kosa K. Deterioration of concrete mechanical properties and fracture of steel bars caused by alkali-silica reaction: A review // Structures. 2022. Vol. 35. Pp. 893–902. URL: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.051>

9. Attar A., Gencturk B., Aryan H., Jianqiang W. Impact of laboratory-accelerated aging methods to study alkali-silica reaction and reinforcement corrosion on the properties of concrete // Materials. 2020. Vol. 13 (15). 3273. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13153273>

10. Сканава Н. А. Материаловедение (строительные материалы). М.: МГСУ, 2010. 85 с.

11. Doleželová M., Krejsová J., Scheinherrová L., Keppert M., Vimmrová A. Investigation of environmentally friendly gypsum based composites with improved water resistance // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 370. 133278. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133278>

12. Wan Y., Hui X., He X., Li J., Xue J, Feng D., Liu X., Wang S. Performance of green binder developed from flue gas desulfurization gypsum incorporating Portland cement and large-volume fly ash // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 348. 128679. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128679>

13. Domanskaya I., Bednyagin S., Fisher H.-B. Water-Resistant Gypsum Binding Agents and Concretes Based Thereof as Promising Materials for Building Green // IOP

Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 177. 012029. Moscow, 18 May 2018. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/177/1/012029>

14. Chernysheva N. V., Lesovik V. S., Drebezgova M. Yu., Shatalova S. V., Alaskhanov A. H. Composite Gypsum Binders with Silica-containing Additives // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 27 (3). 032015. Tomsk, 2018. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/3/032015>

15. Grishina A., Korolev E. Chemical composition of nanomodified cement stone // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. Vol. 263. 01011. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126301011>

16. Stemmermann P., Garbev K., Gasharova B., Beuchle G., Haist M., Divoux T. Chemo-mechanical characterization of hydrated calcium-hydrosilicates with coupled Raman- and nanoindentation measurements // Applied geochemistry. 2020. Vol. 118. 104582. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104582>

17. Saha A. K. A comparative study between ASTM C1567 and ASTM C227 to mitigate alkali-silica reaction // Structural Concrete. 2019. Vol. 20 (1). Pp. 420–427. URL: <https://doi.org/10.1002/suco.201800127>

18. Al-Jabari M., Al-Rashed R., Ayers M. E. Mitigation of alkali silica reactions in concrete using multi-crystalline intermixed waterproofing materials // CEMENT. 2023. Vol. 12. 100065. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cement.2023.100065>

19. Abdalqader A., Fayyad T., Sonebi M. Comparative study on the effect of different supplementary cementitious materials on Alkali-silica reaction of self-compacting concrete // Materials Today: Proceedings. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136187>

References

1. Orlov A. D. *Granulirovannaya penosteklokeramika kak perspektivnyy zapolnitel' dlya novogo pokoleniya energoeffektivnykh betonov* [Granulated glass-ceramic foam as a promising aggregate for a new generation of energy-efficient concrete]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Construction*, 2016, no. 12, pp. 13–15.

2. Sopegin G. V., Semeynykh N. S. *Vliyanie molotogo fraktsionirovannogo penostekla na svoystva gipsovogo vyazhushchego i sukhikh stroitel'nykh smesey* [Influence of ground fractionated foam glass on the properties of gypsum binder and dry building mixtures]. *Molodye uchenye – razvitiyu Natsional'noy tekhnologicheskoy initsiativy – Young Scientists – National Technological Initiative Development*, 2020, no. 1, pp. 626–629.

3. Zakrevskaya L. V., Popov M. Yu. *Legkie betony naosnove granulirovannogo penostekla* [Lightweight concretes on the basis of granulated foam glass].

Arkhitektura. Stroitel'stvo. Obrazovanie – Architecture. Construction. Education, 2015, no. 1 (5), pp. 26–31.

4. Hameed A. M., Hamada R. F. Using the glass and rubber waste as sustainable materials to prepare foamed concrete with improved properties. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 881, 012188. Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/881/1/012188>

5. Il'ina L. V., Tatski L. N., Molodin V. V., Kolesova T. D. *Legkie betony s penosteklokristallicheskim zapolnitelem, modifitsirovannye mikro-i nano-kremnezemom* [Lightweight concrete with foam-glass-crystalline aggregate modified with micro- and nano-silica]. *Ekspert: teoriya i praktika – Expert: Theory and Practice*, 2023, no. 3 (22), pp. 80–85.

6. Ketov Yu. A., Slovikov S. V. *Sintakticheskie polimernye kompozitsionnye materialy vysokonapolnennye granulirovannym penosteklom* [Syntactic polymer composites highly filled with granular foam glass]. *Computational nanotechnology – Computational Nanotechnology*, 2019, vol. 6, no. 3, pp. 39–46.

7. Manevich V. E., Subbotin R. K. *Problemy vzaimodeystviya silikatnykh napolniteley s tsementom* [Problems of interaction of silicate fillers with cement]. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov – Engineering and Technology of Silicates*, 2013, vol. 20, no. 2, pp. 2–7.

8. Chunhua L., Senzhuang B., Yulong Z., Kosa K. Deterioration of concrete mechanical properties and fracture of steel bars caused by alkali-silica reaction. A review. *Structures*, 2022, vol. 35, pp. 893–902. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.051>

9. Attar A., Gencturk B., Aryan H., Jianqiang W. Impact of laboratory-accelerated aging methods to study alkali-silica reaction and reinforcement corrosion on the properties of concrete. *Materials*, 2020, vol. 13 (15), 3273. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma13153273>

10. Skanavi N. A. *Materialovedenie (stroitel'nye materialy)* [Material Science (Building Materials)]. Moscow, MGSU Publ., 2010, 85 p.

11. Doleželová M., Krejsová J., Scheinherrová L., Keppert M., Vimmrová A. Investigation of environmentally friendly gypsum based composites with improved water resistance. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 370, 133278. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133278>

12. Wan Y., et al. Performance of green binder developed from flue gas desulfurization gypsum incorporating Portland cement and large-volume fly ash. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 348, 128679. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128679>

13. Domanskaya I., Bednyagin S., Fisher H.-B. Water-resistant gypsum binding agents and concretes based thereof as promising materials for building green. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*,

vol. 177, 012029, Moscow, 18 May 2018. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/177/1/012029>

14. Chernysheva N. V., Lesovik V. S., Drebezhgova M. Yu., Shatalova S. V., Alaskhanov A. H. Composite gypsum binders with silica-containing additives. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 27 (3), 032015, Tomsk, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/3/032015>

15. Grishina A., Korolev E. Chemical composition of nanomodified cement stone. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*, 2021, vol. 263, 01011. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126301011>

16. Stemmermann P., et al. Chemo-mechanical characterization of hydrated calcium-hydrosilicates with coupled Raman-and nanoindentation measurements. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 118.

104582. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104582>

17. Saha A. K. A comparative study between ASTM C1567 and ASTM C227 to mitigate alkali-silica reaction. *Structural Concrete*, 2019, vol. 20 (1), pp. 420–427. Available at: <https://doi.org/10.1002/suco.201800127>

18. Al-Jabari M., Al-Rashed R., Ayers M. E. Mitigation of alkali silica reactions in concrete using multi-crystalline intermixed waterproofing materials. *Cement*, 2023, vol. 12, 100065. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cement.2023.100065>

19. Abdalqader A., Fayyad T., Sonebi M. Comparative study on the effect of different supplementary cementitious materials on Alkali-silica reaction of self-compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*, 2023. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136187>