СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-8-18

***Кожухова Н.И., Строкова В.В., Коломыцева А.И., Мануйлова А.И., Жерновская И.В.**
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
**E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru*

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ГЕОПОЛИМЕРНОГО ПЕНОБЕТОНА ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ЯЧЕИСТОЙ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ

Аннотация. *Известно, что качество бетонного композита во многом зависит не только от свойств исходного сырья, но также от ряда технологических факторов, которые, зачастую, являются определяющими. В особенности, это актуально при формировании композитов с ячеистой структурой.*

В данной статье рассмотрено влияние различных способов приготовления ячеистой сырьевой смеси при получении геополимерного пенобетона на особенности формирования поровой структуры, а также его физико-механические свойства.

Для оценки качества формируемой ячеистой структуры использовался преимущественно визуальный анализ. Установлено, что для приготовления геополимерной ячеистой сырьевой смеси наиболее эффективными можно считать 2 способа, в которых предусмотрено 3-х стадийное смешение компонентов: приготовление водного щелочного раствора; приготовление пены; приготовление геополимерной суспензии с последующим добавлением в нее пены.

Выявлено, что при использовании способов, предусматривающих 3-х стадийное смешение компонентов, в образцах геоплимерного пенобетона обеспечиваются наиболее низкие значения по таким физическим характеристикам как средняя плотность: 615–620 кг/м^3; и коэффициент теплопроводности: 0,109–0,112 Вт/м^2·°С. При этом, наименее эффективными способами приготовления ячеистой сырьевой смеси для геополимерного пенобетона являются методы, основанные на одностадийном смешении компонентов. В этом случае в пенобетонных образцах наблюдается практически полностью нарушенная целостность структуры пор и, как следствие, неудовлетворительные показатели физико-механических свойств.

Ключевые слова: *геополимерный пенобетон, способ приготовления ячеистой сырьевой смеси, поровая структура, физико-механические свойства.*

Введение. Одним из важных аспектов получения строительных материалов с необходимыми эксплуатационными свойствами является соблюдение требований на протяжении всего технологического процесса: на стадиях подбора сырья, приготовления сырьевой смеси, формовки изделий и условий их твердения. Для известных вяжущих систем и материалов, имеющих широкое практическое применение, существуют отдельные технологические схемы, а также сформулированы и количественно определены требуемые параметры, предъявляемые к сырьевым компонентам, характеристикам вяжущей смеси или сырца, подбора условий их отвердевания и так далее.

В случае новых видов материалов, их эффективное производство затруднено отсутствием таковых общепринятых параметров. Геополимеры в полной мере можно отнести к классу новых, слабо изученных, но перспективных строительных материалов.

Технологические особенности синтеза геополимеров и материалов на их основе активно рассматриваются учеными различных стран [1–5].

В результате большого объема исследований и полученных на их основе экспериментальных данных [6–12] на сегодняшний день сформулированы следующие основные критерии эффективности (качества) сырья и технологии его консолидации для получения геополимерных вяжущих и материалов (рис. 1):

– алюмосиликатный состав с соотношением основных оксидов SiO_2/Al_2O_3 в диапазоне 1,5–2,5;

– содержание оксидов щелочноземельных металлов (CaO, MgO) не более 10 %;

– концентрация рентгеноаморфной составляющей (как правило, стеклофазы) в составе алюмосиликата – не менее 50–60 %;

– низкое содержание оксидов железа (FenOm);

– использование термической сушки для интенсификации процесса консолидации;

– применение солей и гидроксидов щелочных металлов в качестве активатора твердения алюмосиликатного компонента.

Рис. 1. Критерии эффективности сырья и технологии консолидации для получения геополимерных вяжущих и материалов на их основе

Исходя из литературных данных [13–15], геополимерные композиты, получаемые на основе сырья с высокой реакционной активностью, демонстрируют хорошие эксплуатационные (физико-механические) характеристики в широком диапазоне значений. В то же время, использование низкоактивного сырья чревато формированием у конечных композитов неудовлетворительных эксплуатационных характеристик, таких как прочность [16], водостойкость [17] и так далее.

В значительной мере степень реакционной активности алюмосиликатного сырья проявляет себя при получении ячеистых структур на основе геополимеров, поскольку, в данном случае, прочность матрицы оказывает решающий эффект на целостность порового каркаса, который априори более слабый, чем плотный аналог.

В настоящее время ячеистые геополимеры или геополимерные пены (то есть геополимерные системы с пористостью более 70 %) вызывают живой интерес со стороны ученых в области неорганических ячеистых материалов и находят свои потенциальные и реальные области применения в различных сферах [18] благодаря уникальному сочетанию физических, термических и механических свойств [19–21].

Для обеспечения ячеистой структуры в матрице геополимера в литературных источниках предлагается 4 способа производства: метод прямого пенообразования; метод реплик; метод абляционных наполнителей; технология послойного синтеза (3D-печать) (рис. 2) [22].

Среди вышеотмеченных технологий наиболее распространенной является технология прямого пенообразования. Данный метод, основан на формировании ячеистой геополимерной суспензии, которая может быть получена двумя способами:

1) путем аэрирования геополимерной сырьевой смеси – принудительного введения воздуха в вяжущую систему;

2) путем использования порообразующих агентов в виде пено- и газообразователей.

С термодинамической точки зрения аэрирование представляет собой неустойчивый процесс. Это связано с тем, что газовые пузырьки в жидкой фазе пены склонны к произвольному водоистечению, продолжительному Освальдскому созреванию или коалесценции, которая позволяет минимизировать общую свободную энергию Гиббса водовоздушной суспензии. В результате этой неустойчивости формируется макропористость структуры, а также широкий разброс по размерам пор, что является важным фактором, который негативно отражается на эксплуатационных свойствах конечного ячеистого геополимерного композита.

В исследованиях Chengying Bai и других [23] применялся метод прямого вспенивания с использованием перекиси водорода (химического порообразователя) в сочетании со стабилизирующим агентом. В результате были получены ячеистые геополимеры на основе отходов стекла с общей пористостью около 55 %, теплопроводностью примерно 0,21 Вт/м·°С и прочностью на сжатие примерно 7,3 МПа. В качестве дополнительной стадии применялась термическая обработка образцов ячеистых геополимеров при 700–900 °С. Данная процедура позволила обеспечить значительное увеличение объема пено-

массы (вторичное вспенивание). В результате такого подхода были получены образцы с высокой общей пористостью (77–88 %), низкой насыпной плотностью (0,27–0,48 г/см³), низким коэффициентом теплопроводности (0,11–0,15 Вт/м °С), а также довольно высокие показатели прочности на сжатие (1,2–5,5 МПа). Однако, основным недостатком этого метода является необходимость использования высокотемпературной обработки (700–900 °С).

Рис. 2. Существующие способы обеспечения ячеистой структуры матрицы геополимерного композита

Авторами работы [24] предложен способ приготовления пенобетонной смеси, который заключается в перемешивании сухого материала, такого как порошок сталеплавильного шлака, измененный красный шлам, модифицированный метакаолин, порошок молотого шлака; добавлении щелочного активатора и воды в смесь из твердых компонентов и их смешение до образования суспензии; параллельно с этим: приготовление пены путем смешения пенообразователя и воды в соотношении 1:15 с помощью гомогенизатора; добавление полученной пены в суспензию и их смешение в течение 2,5–3 мин до равномерного распределения пены в суспензии. Полученные в результате использования такого метода характеристики геополимерного пенобетона следующие: средняя плотность – 550 кг/м³; прочность на сжатие: – 2,8 МПа, коэффициент теплопроводности –0,107 Вт/(м·°С).

Однако, основными недостатками способа является тот факт, что для обеспечения заявленных эксплуатационных характеристик требуется длительное время отверждения – в течение 28 сут, что значительно увеличивает производственный процесс.

Авторами Cong M., Zhang Sh. И другими [25] описаны методы приготовления и характеристики легкого пенобетона на основе геополимеров, изучено влияние таких факторов как содержание пены, соотношение воды и вяжущего, жидкого стекла содержание и модуль жидкого стекла на производительность приготовления и качество пенобетона. По результатам анализа отмечено, что наиболее важным фактором, влияющим на теплопроводность, является водовяжущее отношение, за которым следовали содержание пены, модуль и концентрация жидкого стекла. При содержании пены 1,58 %, водовяжущем отношении – 0,45, содержании жидкого стекла – 30 %, (модуль жидкого стекла 1,2), теплопроводность приготовленного геополимерного пенобетона достигает 0,044 Вт/(м·°С).

Таким образом, на основании литературного анализа было выявлено, что среди немало важных факторов обеспечения качественной структуры при получении ячеистых геооплимерных бетонов является последовательность введения компонентов в сырьевую смесь. Данный параметр существенным образом влияет на эффективность производственного процесса и качество конечного продукта. Поэтому в рамках данного исследования произведена оценка эффективности использования разных способов приготовления сырьевой пенобетонной смеси с точки зрения формирования ячеистой структуры, а также физико-механических свойств конечного геополимерного пенобетонного композита.

Материалы и методы. В качестве основного алюмосиликатного сырья для синтеза образцов геополимерного пенобетона была использована зола-уноса низкокальциевая (согласно ГОСТ 25818-2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия»), химический состав которой представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав используемых минеральных модификаторов

Модификатор	Содержание оксидов, масс. %											
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	K_2O	MgO	CaO	P_2O_5	SO_3	N_2O	п.п.п.	SiO_2/Al_2O_3
Зола-уноса	58,98	28,29	4,63	0,97	0,65	1	3,74	0,36	–	0,63	6,07	2,08

Химический состав используемой золы-уноса определялся с помощью рентгено-флуоресцентного анализа на спектрометре WorkStation ARL 9900 (Thermo Scientific, USA), с использованием излучения Co-анода.

В рамках данного исследования в качестве щелочного активатора был использован гидроксид натрия NaOH (натрия гидроокись ЧДА), с основными техническими характеристиками, удовлетворяющими требованиям ГОСТ Р 55064-2012 «Натр едкий технический. Технические условия».

Для формирования поровой структуры в геополимерной вяжущей системе в рамках исследования был использован пенообразователь белковый Biofoam (производитель ООО «БиоФомм»).

Вода для проведения лабораторных исследований использовалась водопроводная, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-85 «Вода для бетонов и строительных растворов».

Оценка качества формирования ячеистой структуры затвердевших образцов геополимерного пенобетона, полученных разными способами, осуществлялась с помощью визуального анализа фотографий, снятых на цифровую камеру.

Основная часть. В рамках данного исследования было рассмотрено 5 способов приготовления геополимерной пенобетонной сырьевой смеси, которые отличаются последовательностью введения сырьевых компонентов (рис. 3). Для полученных разными способами пеномасс и образцов геополимерного пенобетона параллельно был произведен визуальный анализ их ячеистой структуры (рис. 4).

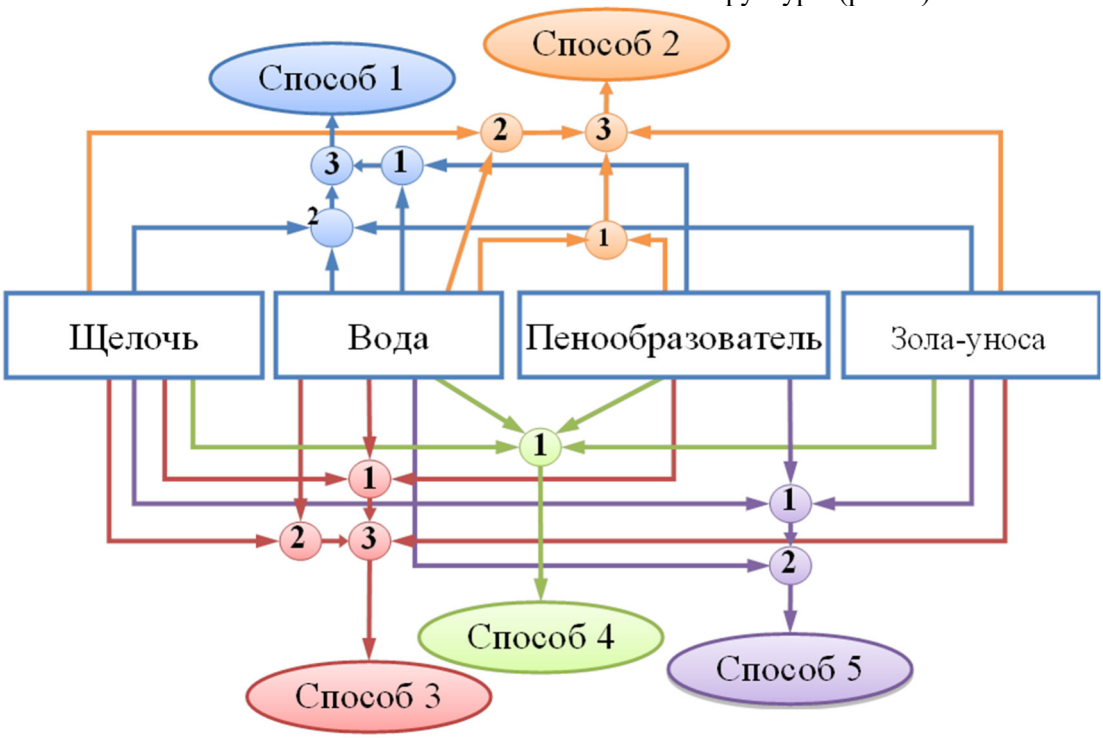
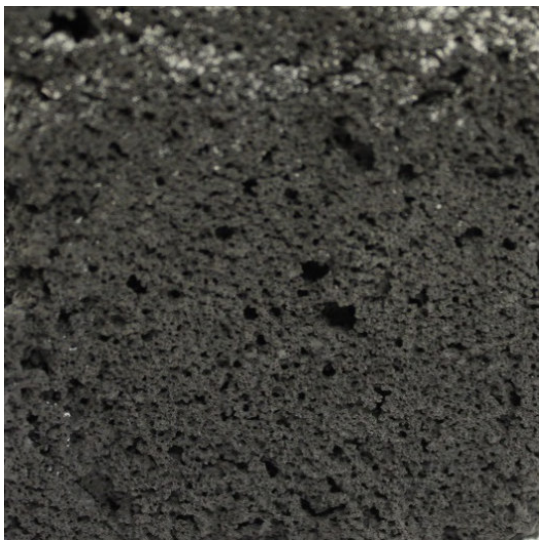


Рис. 3. Способы получения геополимерной пенобетонной смеси

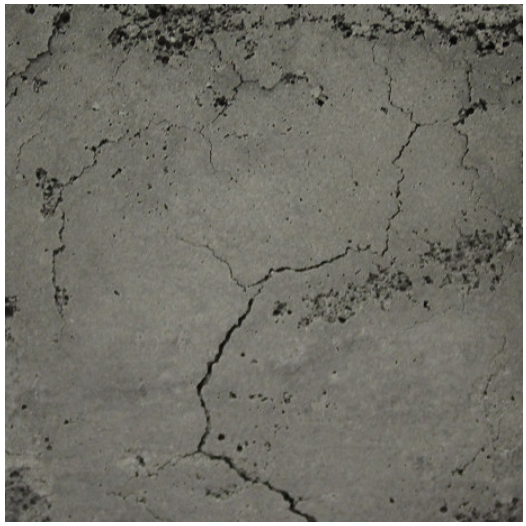
Способ 1 предусматривает отдельное приготовление пены в нейтральной среде (путем смешения пенообразователя и воды) и геополимерного вяжущего (путем смешения воды, щелочи и золы-уноса). Согласно визуальному наблюдению, недостатком данного способа является неполное растворение щелочного компонента и его неравномерное распределение в объеме смеси. Результатом является нарушенная поровая структура с широким разбросом пор по размеру. Кроме того, из-за флуктуаций щелочи, наблюдается наличие высолов на поверхности образца пенобетона (рис. 4, а).



а)

б)

в)



г)

д)

Рис. 4. Образцы геополимерного пенобетона, полученные разными способами:
а – Способ 1; б – Способ 2; в – Способ 3;
г – Способ 4; д – Способ 5

Способ 2 включает в себя 3 стадии: отдельное приготовление пены в нейтральной среде (путем смешения пенообразователя и воды), приготовление щелочного раствора для вяжущего

(путем смешения щелочи и воды до полного растворения твердого компонента), активация золы-уноса щелочным раствором с последующим введением пены. Использование данного метода обеспечивает наиболее эффективное распределение компонентов в объеме смеси, а также оптимальную ячеистую структуру (рис. 4, б).

Способ 3 также предусматривает 3 стадии: приготовление щелочного раствора; о приготовление пены в щелочной среде (путем смешения пенообразователя и части щелочного раствора); приготовление вяжущей суспензии путем смешения оставшейся части щелочного раствора и золы-уноса, с последующим введением пены. С точки зрения особенностей формирующейся ячеистой структуры, *Способ 3* аналогичен *Способу 2*. Однако, с позиции технологического аспекта, в данном случае необходимо предусматривать стадию разделения и дополнительного дозирования щелочного раствора для приготовления пены (рис. 4, в).

Способ 4 предусматривает одну стадию, где все сырьевые компоненты смешиваются одновременно. Этот способ является более простым с технологической точки зрения, но наименее эффективным. При смешении всех компонентов одновременно пеномасса практически не формируется, в результате чего ячеистая структура формируется слабо (рис. 4, г).

Способ 5 состоит из двухстадийного введения компонентов в сырьевую смесь: смешение твердофазных компонентов (зола-уноса и щелочь) и пенообразователя с последующим добавлением воды и дополнительными интенсивным перемешиванием. Этот способ также не позволяет получить желаемый объем пеномассы и, впоследствии, ячеистую структуру твердеющего образца (рис. 4, д).

Анализируя визуальные особенности образцов геополимерного пенобетона, полученных разными способами, следует отметить, что наиболее эффективным с точки зрения структуры сформированной пеномассы и оптимальным с точки зрения технологии, являются *Способ 2* и *Способ 3*.

Анализ структурно-механических и рецептурно-технологических особенностей геополимерных пенобетонных смесей и готовых изделий, полученных пятью различными способами последовательности введения компонентов (зола-уноса, щелочь, пенообразователь и вода) позволил проранжировать их по повышению эффективности в следующей последовательности: *Способ 4 → Способ 5 → Способ 1 → Способ 3 → Способ 2*.

Полученные затвердевшие образцы геополимерного пенобетона также были изучены по следующим основным эксплуатационным характеристикам: предел прочности на сжатие, средняя плотность и коэффициент теплопроводности. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики исследуемых экспериментальных образцов геополимерного пенобетона

Способ	Предел прочности при сжатии, МПа	Средняя плотность, кг/м^3	Марка по плотности	Коэффициент теплопроводности, Вт/м^2·°С
1	0,74	711	D700	0,22
2	0,59	620	D700	0,112
3	0,53	615	D700	0,109
4	1,3	1200	D1200	0,45
5	1,06	987	D1000	0,32

Результаты физико-механических характеристик образцов геополимерного пенобетона, полученных разными способами введения сырьевых компонентов, показали, что особенности формируемой ячеистой структуры оказывают прямое влияние на показатели прочности на сжатие, средней плотности, а также коэффициента теплопроводности. Так, образцы пенобетона, полученные *Способами 2* и *3*, характеризуются схожей (при визуальной оценке, (рис. 4 б, в)) ячеистой структурой, однако, с более правильной округлой формой пор при использовании *Способы 3*. Также для этих способов характерны более низкие значения по средней плотности: 615 и 620 кг/м^3; и коэффициенту теплопроводности: 0,109 и 0,112 Вт/м^2·°С, при использовании *Способов 3* и *2*, соответственно. В тоже время, наиболее высокими показателями по средней плотности: 987 и 1200 кг/м^3; и коэффициенту теплопроводности: 0,32 и 0,45 Вт/м^2·°С характеризуются пенобетонные образцы, полученные *Способами 5* и *4*, соответственно, для которых наблюдаются глубинные трещины и практически полностью нарушена ячеистая структура (рис. 4 д, г). Показатели прочности на сжатие также имеют хорошую корреляцию со средней плотностью и коэффициентом теплопроводности для всех экспериментальных образцов (см. табл. 2).

Выводы. На основании проведённого исследования была установлена прямая зависимость качества формирующейся ячеистой структуры и физико-механический свойств геополимерного пенобетона от способа приготовления сырьевой пенобетонной смеси. Среди предложенных пяти способов приготовления сырьевой смеси наиболее эффективными были выявлены способы, в которых предусмотрено 3-х стадийное смешение компонентов: приготовление пены; приготовление водного щелочного раствора; приготовление геополимерной суспензии с последующим добавлением пены. В этом случае в образцах геополимерного пенобетона формируется наиболее эффективная и правильная ячеистая структура, а также выгодное сочетание показателей средней плотности, коэффициента теплопроводности и прочности на сжатие.

Благодарности. *Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе БГТУ им. В.Г. Шухова. Работа выполнена с использованием оборудования ЦВТ на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Andini S., Cioffi R., Colangelo F., Grieco T., Montagnaro F., Santoro L. Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products // Waste Management. 2008. Vol. 28. Issue 2. Pp. 416–423. doi: 10.1016/j.wasman.2007.02.001.

2. Van Jaarsveld J., Van Deventer J., Lukey G. The effect of composition and temperature on the propertiesof fly ash- and kaolinite-based geopolymers // Chemical Engineering Journal. 2002. Vol. 89. Pp. 63–73. doi: 10.1016/s1385-8947(02)00025-6.

3. You S., Ho W., Li T., Maneerung T., Wang C.-H. Techno-economic analysis of geopolymer production from the coal fly ash with high iron oxide and calcium oxide contents // Journal of Hazardous Materials. 2019. Vol. 361. Pp. 237–244. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.08.089.

4. Santa R.A.A.B., Bernardin A.M., Riella H.G., Kuhnen N.C. Geopolymer synthetized from bottom coal ash and calcined paper sludge // Journal of Cleaner Production. 2013. Vol. 57. Pp. 302–307. doi:10.1016/j.jclepro.2013.05.017.

5. Part W.K., Ramli M., Cheah C.B. An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 77. Pp. 370–395. doi:10.1016/b978-0-12-804524-4.00011-7.

6. Кожухова Н.И., Строкова В.В., Кожухова М.И., Жерновский И.В. Структурообразование в щелочеактивированных алюмосиликатных вяжущих системах с использованием природного сырья различной кристалличности // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. № 4. С. 38–43. doi: 10.34031/2618-7183-2018-1-4-38-43.

7. Barbosa V.F.F., MacKenzie K.J.D., Thaumaturgo C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers // International Journal of Inorganic Materials. 2000. Vol. 2. № 4. Pp. 309–317. doi: 10.1016/s1466-6049(00)00041-6.

8. Alex, T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere // International Journal of Mineral Processing. 2013. Vol. 123. Pp. 102–107. doi:10.1016/j.minpro.2013.06.001.

9. Davidovits J. Geopolymer chemistry and applications: Saint-Quentin, France. 2011. 612 p.

10. Кожухова Н.И., Строкова В.В., Чижов Р.В., Кожухова М.И. Методика оценки реакционной активности алюмосиликатов кислого состава с нанокристаллической структурой // Строительные материалы и изделия. 2019. Т.2. № 3. С. 5–11. doi: 10.34031/2618-7183-2019-2-3-5-11.

11. Shekhovtsova J., Zhernovsky I., Kovtun M., Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kearsley E. P. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements - a step towards sustainable building material and waste utilization // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 178. Pp. 22–33. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.270.

12. Rickard W.D., Williams R., Temuujin J., Van Riessen A. Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high temperature applications // Materials Science and Engineering: A. 2011. Vol. 528. Issue 9. Pp. 3390–3397. doi:10.1016/j.msea.2011.01.005.

13. Ziolkowski M., Kovtun M. Confined-direct electric curing of NaOH-activated fly ash based brick mixtures under free drainage conditions: Part 2. Confined-DEC versus oven curing // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 176. Pp. 452–461. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.041.

14. Ziolkowski M., Kovtun M. Confined-Direct Electric Curing of NaOH-activated fly ash based brick mixtures under free drainage conditions: Part 1. Factorial experimental design //Construction and Building Materials. 2017. Vol. 155. Pp. 1050–1062. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.135.

15. Kozhukhova N.I., Teslya A.Yu., Kozhukhova M.I., Zhernovsky I.V., Yermak S.N., Ogurtsova Yu.N. In-service performance of hybrid geopolymer binders based class F fly ash // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 552. № 012035. doi: 10.1088/1757-899x/552/1/012035.

16. Bernal S.A., Bejarano J., Garzon C., Mejia de Gutierrez R., Delvasto S., Rodríguez E.D. Performance of refractory aluminosilicate particle/fiber-reinforced geopolymer composites // Composites Part B: Engineering. 2012. Vol. 43. Issue 4. Pp. 1919–1928. doi: 10.1016/j.compositesb.2012.02.027.

17. Sabbatini A., Vidal L., Pettinari C., Sobrados I., Rossignol S. Control of shaping and thermal resistance of metakaolin-based geopolymers // Materials and Design. 2017. Vol. 116. Pp. 374–385. doi: 10.1016/j.matdes.2016.12.039.

18. Amran Y.H.M., Farzadnia N., Ali A.A.A. Properties and applications of foamed concrete // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 101. Pp. 990–1005. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112.

19. Zhang Z., Provis J.L., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 56. Pp. 113–127. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081.

20. Lecomte M., Liegeois M., Rulmont A., Cloots R., Maseri F. Synthesis and characterization of newinorganic polymeric composites based on kaolin or white clay and on ground-granulated blast furnace slag // Journal of Materials Research. 2003. Vol. 18. Issue 11. Pp. 2571–2579. doi: 10.1557/jmr.2003.0360.

21. Palmero P., Formia A., Antonaci P., Brini S., Tullinari J.-M. Geopolymer technology for application oriented dense and lightened materials. Elaboration and characterization // Ceramics International. 2015. Vol. 41. Issue 10. Pp. 12967–12979. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.06.140.

22. Bai C., Colombo P. Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review // Ceramics International. 2018. Vol. 44. Issue 14. Pp. 16103–16118. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.05.219.

23. Bai C., Li H., Bernardo E., Colombo P. Waste-to-resource preparation of glass-containing foams from geopolymers // Ceramics International. 2019. Vol. 45. Issue 6. Pp. 7196–7202. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.12.227.

24. Yin P., Pang H., Jiang X., Jin H., Cheng Y. Ground polymers foam concrete and preparation method thereof. Патент № CN201710279623.0A. 2017-09-22.

25. Cong M., Zhang Sh., Sun D., Zhou K. Optimization of Preparation of Foamed Concrete Based on Orthogonal Experiment and Range Analysis // Frontiers in Materials. 2021. Vol. 8. 778173. doi:10.3389/fmats.2021.778173.

Информация об авторах

Кожухова Наталья Ивановна, кандидат технических наук, доцент, кафедра материаловедения и технологии материалов. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Строкова Валерия Валерьевна, доктор технических наук, профессор, кафедра материаловедения и технологии материалов. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Коломыцева Анна Ивановна, магистрант, кафедра материаловедения и технологии материалов. E-mail: anna.kolomytceva@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Мануйлова Анна Игоревна, магистрант, кафедра материаловедения и технологии материалов. E-mail: anna.manuilova.00@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Жерновская Ирина Васильевна, старший преподаватель, кафедра высшей математики. E-mail: ziv_1111@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 20.06.2022 г.

© Кожухова Н.И., Строкова В.В., Коломыцева А.И., Мануйлова А.И., Жерновская И.В., 2022

Kozhukhova N.I., Strokova V.V., Kolomytseva A.I., Manuilova A.I., Zhernovskaya I.V.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
**E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru*

FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF GEOPOLYMER FOAM CONCRETE WITH DIFFERENT METHODS OF PREPARING A CELLULAR RAW MIXTURE

Abstract. *It is known that the quality of a concrete composite, especially a cellular one, largely depends not only on the properties of the original raw materials but also on many technological factors, which are often decisive. In particular, this is relevant when forming a cellular structure. This article discusses the influence of various methods of preparing a cellular raw mixture in the synthesis of geopolymer foam concrete on the features of the formation of its cellular structure, as well as its physical and mechanical properties. Visual analysis was used to assess the quality of formation of the cellular structure. It has been established that for the preparation of a geopolymer cellular raw mixture, 2 methods were identified as the most effective, in which a 3-stage mixing of components is provided: preparation of an aqueous alkaline solution; preparation of foam; preparation of a geopolymer suspension followed by the addition of foam. It was found that when using both methods with a 3-stage mixing of components, samples of geopolymer foam concrete contribute to providing the lowest values for such physical characteristics as average density: 615–620 kg/m^3; and thermal conductivity coefficient: 0.109–0.112 W/m^2·^{o}C. At the same time, the least effective methods of preparing a raw mixture are a one-stage mixing of components, in which an almost destroyed cellular structure is observed and, as a result, unsatisfactory indicators of physical and mechanical properties.*

Keywords: *geopolymer foam concrete, raw cellular mixture preparation method, cellular structure, physical and mechanical properties.*

REFERENCES

1. Andini S.R., Cioffi F. Colangelo T. Grieco F. Montagnaro L. Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products. Waste Management. 2008. Vol. 28. Issue 2. Pp. 416–423. doi: 10.1016/j.wasman.2007.02.001.

2. Van Jaarsveld J., Van Deventer J., Lukey G. The effect of composition and temperature on the propertiesof fly ash- and kaolinite-based geopolymers. Chemical Engineering Journal. 2002. Vol. 89. Pp. 63–73. doi: 10.1016/s1385-8947(02)00025-6.

3. You S., Ho W., Li T., Maneerung T., Wang C.-H. Techno-economic analysis of geopolymer production from the coal fly ash with high iron oxide and calcium oxide contents. Journal of Hazardous Materials. 2019. Vol. 361. Pp. 237–244. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.08.089.

4. Santa R.A.A.B., Bernardin A.M., Riella H.G., Kuhnen N.C. Geopolymer synthetized from bottom coal ash and calcined paper sludge. Journal of Cleaner Production. 2013. Vol. 57. Pp. 302–307. doi:10.1016/j.jclepro.2013.05.017.

5. Part W.K., Ramli M., Cheah C.B. An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. Construction and Building Materials. 2015. Vol. 77. Pp. 370–395. doi:10.1016/b978-0-12-804524-4.00011-7.

6. Kozhukhova N.I., Strokova V.V., Kozhukhova M.I., Zhernovsky I.V. Structure formation in alkali activated aluminosilicate binding systems using natural raw materials with different crystallinity degree [Strukturoobrazovanie v shchelocheaktivirovannyh alyumosilikatnyh vyazhushchih sistemah s ispol'zovaniem prirodnogo syr'ya razlichnoj kristallichnosti]. Construction Materials and Products. 2018. 1(4). Pp. 38–43. doi: 10.34031/2618-7183-2018-1-4-38-43 (rus).

7. Barbosa V.F.F., MacKenzie K.J.D., Thaumaturgo C. Synthesis and characterization of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. International Journal of Inorganic Materials. 2000. Vol. 2. No. 4. Pp. 309–317. doi: 10.1016/s1466-6049(00)00041-6.

8. Alex T.C., Nath S.K., Kumar S., Kalinkin A.M., Gurevich B.I., Kalinkina E.V., Tyukavkina V.V. Utilization of zinc slag through geopolymerization: influence of milling atmosphere. International Journal of Mineral Processing. 2013. Vol. 123. Pp. 102–107. doi:10.1016/j.minpro.2013.06.001.

9. Davidovits J. Geopolymer chemistry and applications: Saint-Quentin. France. 2011. 612 p.

10. Kozhukhova N.I., Strokova V.V., Chizhov R.V., Kozhukhova M.I. Chemical reactivity assessment method of nanostructured low calcium aluminosilicates [Metodika ocenki reakcionnoj aktivnosti alyumosilikatov kislogo sostava s nanokristallicheskoj strukturoj]. Construction Materials and Products. 2019. 2 (3). Pp. 5–1. doi:10.34031/2618-7183-2019-2-3-5-11 (rus).

11. Shekhovtsova J., Zhernovsky I., Kovtun M., Kozhukhova N., Zhernovskaya I., Kearsley E. P. Estimation of fly ash reactivity for use in alkali-activated cements - a step towards sustainable building material and waste utilization. Journal of Cleaner

Production. 2018. Vol. 178. Pp. 22–33. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.270.

12. Rickard W.D., Williams R., Temuujin J., Van Riessen A. Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high temperature applications. Materials Science and Engineering: A. 2011. Vol. 528. Issue 9. Pp. 3390–3397. doi:10.1016/j.msea.2011.01.005.

13. Ziolkowski M., Kovtun M. Confined-direct electric curing of NaOH-activated fly ash based brick mixtures under free drainage conditions: Part 2. Confined-DEC versus oven curing. Construction and Building Materials. 2018. Vol. 176. Pp. 452–461. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.041.

14. Ziolkowski M., Kovtun M. Confined-Direct Electric Curing of NaOH-activated fly ash based brick mixtures under free drainage conditions: Part 1. Factorial experimental design. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 155. Pp. 1050–1062. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.135.

15. Kozhukhova N.I., Teslya A.Yu., Kozhukhova M.I., Zhernovsky I.V., Yermak S.N., Ogurtsova Yu. N. In-service performance of hybrid geopolymer binders based class F fly ash. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 552. 012035. doi: 10.1088/1757-899x/552/1/012035.

16. Bernal S.A., Bejarano J., Garzon C., Mejia de Gutierrez R., Delvasto S., Rodríguez E.D. Performance of refractory aluminosilicate particle/fiber-reinforced geopolymer composites. Composites Part B: Engineering. 2012. Vol. 43. Issue 4. Pp. 1919–1928. doi: 10.1016/j.compositesb.2012.02.027.

17. Sabbatini A., Vidal L., Pettinari C., Sobrados I., Rossignol S. Control of shaping and thermal resistance of metakaolin-based geopolymers. Materials and Design. 2017. Vol. 116. Pp. 374–385. doi: 10.1016/j.matdes.2016.12.039.

18. Amran Y.H.M., Farzadnia N., Ali A.A.A. Properties and applications of foamed concrete. Construction and Building Materials. 2015. Vol. 101. Pp. 990–1005. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112.

19. Zhang Z., Provis J.L., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction. Construction and Building Materials. 2014. Vol. 56. Pp. 113–127. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081.

20. Lecomte M., Liegeois M., Rulmont A., Cloots R., Maseri F. Synthesis and characterization of newinorganic polymeric composites based on kaolin or white clay and on ground-granulated blast furnace slag. Journal of Materials Research. 2003. Vol. 18. Issue 11. Pp 2571–2579. doi: 10.1557/jmr.2003.0360.

21. Palmero P., Formia A., Antonaci P., Brini S., Tullinari J.-M. Geopolymer technology for application oriented dense and lightened materials. Elaboration and characterization. Ceramics International. 2015. Vol. 41. Issue 10. Pp. 12967–12979. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.06.140.

22. Bai C., Colombo P. Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review. Ceramics International. 2018. Vol. 44. Issue 14. Pp. 16103–16118. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.05.219.

23. Bai C., Li H., Bernardo E., Colombo P. Waste-to-resource preparation of glass-containing foams from geopolymers. Ceramics International. 2019. Vol. 45. Issue 6. Pp. 7196–7202. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.12.227.

24. Yin P., Pang H., Jiang X., Jin H., Cheng Y. Ground polymers foam concrete and preparation method thereof. Patent No CN201710279623.0A. 2017-09-22.

25. Cong M., Zhang Sh., Sun D., Zhou K. Optimization of Preparation of Foamed Concrete Based on Orthogonal Experiment and Range Analysis. Frontiers in Materials. 2021. Vol. 8. 778173. doi:10.3389/fmats.2021.778173.

Information about the authors

Kozhukhova, Natalia I. PhD, assistant professor, Department of Material Science and Material Technology. E-mail: kozhuhovanata@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Strokova, Valeria V. PhD, Professor, Department of Material Science and Material Technology. E-mail: vvstrokova@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Kolomytseva, Anna I. Master student, Department of Material Science and Material Technology. E-mail: anna.kolomytceva@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Manuilova, Anna I. Master student, Department of Material Science and Material Technology. E-mail:anna.manuilova.00@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Zhernovskaya, Irina V. Senior lecturer, Department of Advanced Mathematics. E-mail: ziv_1111@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Received 20.06.2022

Для цитирования:
Кожухова Н.И., Строкова В.В., Коломыцева А.И., Мануйлова А.И., Жерновская И.В. Формирование структуры и свойств геополимерного пенобетона при разных способах приготовления ячеистой сырьевой смеси // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-8-18

For citation:
Kozhukhova N.I., Strokova V.V., Kolomytseva A.I., Manuilova A.I., Zhernovskaya I.V. Formation of the structure and properties of geopolymer foam concrete with different methods of preparing a cellular raw mixture. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 11. Pp. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-8-18