

# Выбор активатора для синтеза вспененных геополимеров на основе отходов твердоотопливной энергетики\*

Смолий В.А., Головки Д.А., Вильбицкая Н.А., Миргородский А.И., Старовойтов А.И.  
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова  
г. Новочеркасск, Российская Федерация  
[dima.golovko.9898@mail.ru](mailto:dima.golovko.9898@mail.ru)

**Аннотация.** В работе изучены активирующие добавки, влияющие на пористую структуру и свойства вспененных геополимеров на основе золошлаковых отходов. Изучено влияние активаторов на структуру и технологические свойства пористых геополимерных материалов. Рассмотрены существующие активаторы. Описана технология получения вспененных геополимеров с различными активаторами. Показана методика исследования физико-механических свойств. Изучено влияние активаторов на структуру и технологические свойства пористых геополимерных материалов. Изучен внешний вид, макро- и макроструктура полученных образцов. В результате исследований установлено, что наилучшими эксплуатационными свойствами обладает образец на основе гидроксида натрия 3 % и силиката натрия 19 % с плотностью 335 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводностью 0,0748 В/(м·К) и прочностью на сжатие 0,55 МПа.

**Ключевые слова:** щелочная активация, пористые геополимеры, теплоизоляция, утилизация, золошлаковые отходы.

## ВВЕДЕНИЕ

Принципиальным отличием получения вспененных геополимеров от известных пористых материалов является высокое содержание в сырьевой смеси щелочного компонента – активатора, способствующего синтезу в продуктах гидратации низкоосновных фаз гидросиликатного и щелочного алюмосиликатного состава, обладающих высокой связующей способностью и низкой растворимостью.

Модуль активатора является важнейшим фактором и определяется как массовое отношение SiO<sub>2</sub> к Na<sub>2</sub>O или (K<sub>2</sub>O) в щелочном активаторе. Дозировка или общая масса Na<sub>2</sub>O в растворе щелочного активатора в основном включает сумму масс Na<sub>2</sub>O, присутствующих в растворе силиката натрия и/или гидроксида натрия.

В работе В.Д. Глуховского были исследованы и разделены щелочные активаторы на 6 групп:

1. Едкие щелочи: MOH;
2. Несиликатные соли слабых кислот: M<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, M<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, M<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, MF и т.д.;
3. Силикаты: M<sub>2</sub>O·nSiO<sub>2</sub>;
4. Алюминаты: M<sub>2</sub>O·nAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
5. Алюмосиликаты M<sub>2</sub>O·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·(2-6)SiO<sub>2</sub>;
6. Несиликатные соли сильных кислот: M<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Также известно, что могут применяться карбонаты натрия и калия, фторид натрия и другие соли щелочных металлов, дающие щелочную реакцию.

В активированных фосфатом системах (САФ) некоторые твердые агенты могут быть включены в алюмосиликатные источники, чтобы вызвать кислотно-основную химию, которая обычно способствует образованию кристаллических или аморфных фосфатных фаз при химической активации алюмосиликатов. Первоначально высвобождение катионов из оксидов металлов происходит в результате реакции гидролиза, после чего катионы металлов реагируют с водой с образованием аква-ионов. Поликислоты, образованные кислотой или кислотой (например, фосфатными радикалами), реагируют с аква-ионами (например, Mg[H<sub>2</sub>O]<sup>2+</sup>). Весь процесс превращения золь (т.е. коллоидных растворов) в гели можно охарактеризовать как экзотермический и быстрый. Такая быстрая кислотно-основная химия может быть использована для возможного улучшения ранних характеристик фосфатной активации алюмосиликата.

Геополимерные фосфатные соединения, состоящие из кристаллического гидроксиапатита и брушита, встроенных в матрицу поли(сиалат)/SiO<sub>2</sub> исследовались в работах. В дальнейшем алюмосиликатные предшественники, консолидированные фосфатами или ортофосфорными кислотами, были исследованы для изготовления огнеупорных литых изделий, которые можно определить, как фосфатную активацию алюмосиликатов с получением САФ геополимера с превосходной долговечностью и устойчивостью к высоким температурам. Использование фосфата или фосфорной кислоты в качестве активатора позволяет в результате химического взаимодействия с алюмосиликатами получить геополимерное связующее с конденсированными поли(силико-алюмофосфатными) фазами [1-5].

В молекулярной структуре САФ геополимера, звенья [AlO<sub>4</sub>]<sup>5-</sup>, [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> и [PO<sub>4</sub>]<sup>3-</sup> действуют как основные блоки. По сравнению с щелочно-активированными (ЩАС) геополимером, звено [PO<sub>4</sub>]<sup>3-</sup> замещает ион щелочного металла, как сообщает. Модель Кьюи показала, что частичная замена звена [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> на [PO<sub>4</sub>]<sup>3-</sup> в разорванных связях Si-O-Al может происходить в низкополимерной сетке. Таким образом, баланс зарядов внутри молекулярной структуры

\* Работа выполнена в рамках реализации проекта по соглашению о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации «Углеродно-нейтральные технологии рециклинга крупнотоннажных отходов топливной энергетики с получением функциональных геополимерных материалов» от «29» июня 2022 г., № 075-15-2022-1111.

Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Строительство, архитектура и техносферная безопасность", <https://iccats.org>

может быть достигнут без участия одновалентных катионов. Предыдущие исследования показали, что обновленная связь Si-O-Al (т.е. Al-OP) может сбалансировать заряд благодаря химическому сдвигу алюминия в диапазоне от октаэдрической и/или пентаэдрической координации до тетраэдрической формы. Однако многие исследования показали, что в САФ геополимерах доминирует гексакоординированный алюминий. Следует отметить, что в ЩАС геополимере была обнаружена аморфная структура Si-Al-P, в которой было идентифицировано, что тетраэдрический P занимает часть места силиката [5-10].

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На предшествующих этапах исследований установлено, что для синтеза геополимеров золошлаковая смесь с добавкой силиката натрия является наиболее подходящим сырьевым материалом, оптимальной порообразующей добавкой - алюминиевый порошок в количестве 2 %. Для определения оптимального количества гидроксида натрия и его влияния на технологические свойства вспененных геополимерных материалов готовили сырьевые смеси, содержащие от 0 до 4 % NaOH. В табл. 1 приведен компонентный состав шихт для выбора оптимального количества гидроксида натрия.

Таблица 1

Компонентный состав сырьевой смеси для выбора оптимального количества гидроксида натрия, мас. %

Номер состава	ЗШС	Силикат натрия	Гидроксид натрия	Алюминиевый порошок	Вода, сверх 100
1.1	77	21	0	2	0
1.2	76	21	1	2	2
1.3	75	21	2	2	4
1.4	74	21	3	2	6
1.5	73	21	4	2	8

Синтез пористых геополимеров проводили следующим образом:

1. Готовили 12 М раствор гидроксида натрия и смешивали его с жидким стеклом;
2. Полученный раствор гидроксида натрия и жидкого стекла (активатор) смешивали с ЗШО (зола, шлак, золошлаковая смесь) Новочеркасской ГРЭС;
3. В полученную смесь добавляли порошок алюминия, выступающего в роли порообразователя, и перемешивали в течение 30 секунд;
4. Полученную суспензию разливали в кубические формы и отправляли на отверждение при температуре 80 °С в течение 12 часов.

Экспериментально установлено, что оптимальное количество гидроксида натрия составляет 3 %. Дальнейшие исследования по определению влияния количества силиката натрия на технологические свойства геополимерных материалов при его содержании 17, 19, 21, 23 и 25 % проводились при содержании 3 % NaOH. В табл. 2 приведен компонентный состав сырьевой смеси для выбора оптимального количества силиката натрия.

Таблица 2

Компонентный состав сырьевой смеси при выборе оптимального количества силиката натрия, мас. %

Номер состава	ЗШС	Силикат натрия	Гидроксид натрия	Алюминиевый порошок	Вода, сверх 100
2.1	78	17	3	2	6
2.2	76	19	3	2	6
2.3	74	21	3	2	6
2.4	72	23	3	2	6
2.5	70	25	3	2	6

Определяемые технологические свойства геополимерных материалов: плотность – отношение массы к его объему; прочность на сжатие образцов определялась на гидравлическом прессе марки ТП-1-1500; пористость – отношение объемной плотности к истинной плотности; теплопроводность – измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 «100» измеряет толщину образца, плотность теплового потока и температуру противоположных лицевых граней и на основании полученных данных вычисляет коэффициент теплопроводности [10-21].

Для определения влияния молярной концентрации раствора ортофосфорной кислоты (активатора) и соотношения масс активатора к алюмосиликатному прекурсоры на свойства отвержденных образцов геополимеров, вспененных при воздействии СВЧ электромагнитного поля, проведены их механические испытания с определением ранней прочности на сжатие непосредственно после обработки в микроволновой печи (800 Вт, 10 мин) и расформовки. Исследовалось влияние молярной концентрации ортофосфорной кислоты от 8М до 14М на прочность геополимеров, при установленном ранее оптимальном содержании горелой породы отвалов угольных шахт – 67,8 мас. %.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Структура полученных геополимерных материалов при содержании гидроксида натрия от 0 до 4 % представлена на рис. 1.

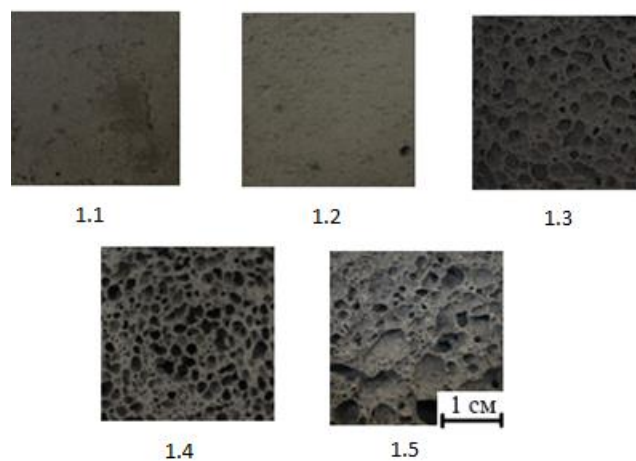


Рис. 1. Структура полученных геополимерных материалов при разном содержании гидроксида натрия

Как видно из рис. 1, при отсутствии в составе гидроксида натрия (образцы 1.1) формирование пористой структуры практически не происходит. Использование только силиката натрия в качестве активирующего раствора не приводит к образованию растворенных частиц, необходимых для формирования алюмосиликатного каркаса, поскольку в нем недостаточно ионов  $\text{OH}^-$ . При увеличении содержания щелочи размер пор увеличивается. Следовательно, чем больше щелочи в составе реакционной смеси, тем активнее происходит вспенивание геополимерного материала. С увеличением концентрации  $\text{Na}_2\text{O}$  в геополимере растворимость аморфного диоксида кремния и оксида алюминия в прекурсор увеличивается. В реакции синтеза геополимера участвует большее количество растворенных ионов Si и Al, что приводит к большему количеству продуктов синтеза. У образца 1.5 наблюдаются неравномерные поры большого размера. Это связано с избыточным количеством щелочи и слишком интенсивным вспениванием [22-27].

Технологические свойства полученных геополимерных материалов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Технологические свойства полученных геополимерных материалов

Номер образца	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	Прочность, МПа	Расчетная пористость, %	Расчетная теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
1.1.	1202	4,48	48,47	0,2722
1.2.	786	1,47	66,30	0,1755
1.3.	373	0,59	84,02	0,0828
1.4.	353	0,57	84,85	0,0787
1.5.	319	0,37	86,31	0,0715

Из табл. 3 видно, что наилучшими свойствами обладают образцы 1.4, средняя плотность и прочность составляет  $345 \text{ кг}/\text{м}^3$  и  $0,54 \text{ МПа}$ . У образцов 1.1, 1.2 и 1.3 большая плотность, следовательно, они менее предпочтительны в качестве теплоизоляционного материала. У образцов 1.5 меньшая плотность и прочностные свойства хуже на 35 % по сравнению с 1.4. Таким образом, для дальнейших исследований был выбран гидроксид натрия с содержанием 3 %.

Структура полученных геополимерных материалов при разном содержании силиката натрия представлена на рис. 2.

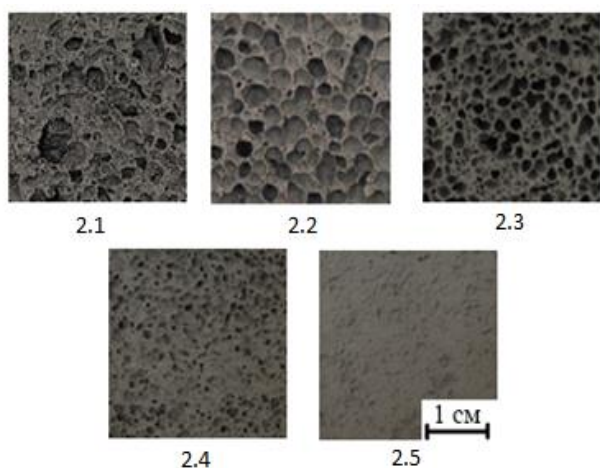


Рис. 2. Структура полученных геополимерных материалов при разном содержании силиката натрия

Как видно из рис. 2, увеличение концентрации силиката натрия увеличивает соотношение Si/Al и вязкость реакционной системы, что приводит к более равномерному распределению пор. Слияние этих пор в крупные поры тормозится увеличением содержания силикатов при конденсации, что приводит к образованию однородной и более мелкопористой системы геополимерной матрицы. Образцы 2.2 и 2.3 имеют лучшие теплоизоляционные характеристики. И наоборот, геополимерные материалы, синтезированные из силиката с низкой концентрацией, имеют неоднородно распределенные макропоры большого диаметра 2.1. В образцах 2.4 и 2.5 избыточное количество силиката натрия, смесь слишком жидкая и пена оседает. В табл. 4 показаны свойства полученных геополимерных материалов.

Таблица 4

Свойства полученных геополимерных материалов

Номер образца	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	Прочность, МПа	Расчетная пористость, %	Расчетная теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
2.1	389	0,55	83,33	0,0862
2.2	335	0,55	85,63	0,0748
2.3	353	0,57	84,85	0,0787
2.4	523	512	0,70	78,04
2.5	702	1,67	69,91	0,1561

Проведенные исследования по выбору оптимального количества силиката натрия для синтеза вспененных геополимеров показали, что наилучшими свойствами обладают образцы 2.2 с 19 % силиката натрия. У образцов средняя плотность и прочность составляет  $341 \text{ кг}/\text{м}^3$  и  $0,58 \text{ МПа}$ .

Результаты проведенных механических испытаний геополимеров при различном соотношении ортофосфорной кислоты к алюмосиликатному прекурсор представлены на рис. 3. Увеличение молярной концентрации раствора ортофосфорной кислоты с 8М до 14М приводит к увеличению прочности на сжатие вспененных геополимерных материалов с  $0,33 \text{ МПа}$  до  $6,79 \text{ МПа}$ , соответственно. Низкая прочность образцов на сжатие при низкой концентрации раствора активатора может быть связана с низкой реакционной способностью входящих в состав ГПО минеральных фаз, что обуславливает наличие большого количества непрореагировавших частиц в отвержденных образцах. В свою очередь 14М раствор ортофосфорной кислоты обеспечивает наибольшую деполимеризации исходных материалов, что предполагает образование трехмерной пространственной сетки связей Si-O-P-O-Si. При этом высокое содержание  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  способствует образованию силанольных групп и фосфата кремния, необходимого для процесса поликонденсации.

Дальнейшее варьирование массового соотношения "раствор активатора/прекурсор" (А/П) обеспечивает дополнительный прирост прочности на ~20% (при А/П = 0,472). Соотношение масс активатора на основе 14М раствора ортофосфорной кислоты к алюмосиликатному прекурсор равно 0,475 обеспечивает приемлемую подвижность свежеприготовленной геополимерной смеси. Ранняя прочность на сжатие вспененных геополимерных материалов в этом случае достигает  $8,13 \text{ МПа}$  (рис. 4).



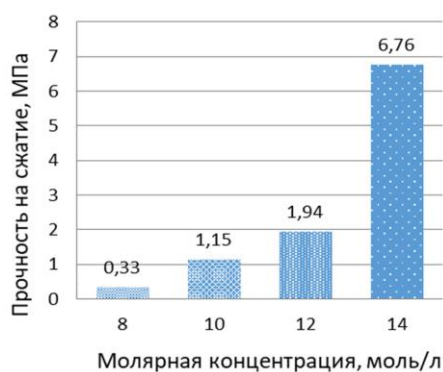


Рис. 3. Влияние молярной концентрации раствора ортофосфорной кислоты (активатора) на раннюю прочность на сжатие отвержденных образцов геополимеров

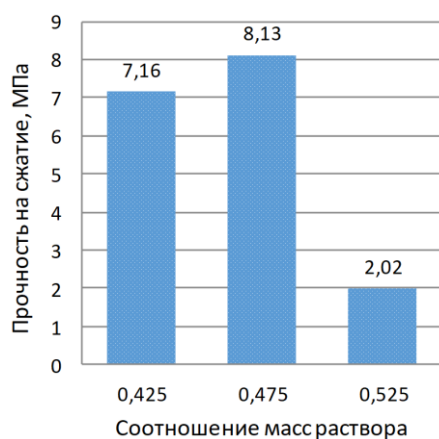


Рис. 4. Влияние соотношения масс активатора к алюмосиликатному прекурсор на раннюю прочность на сжатие отвержденных образцов геополимеров.

Проведенные исследования по выбору оптимального состава и количества активатора для синтеза вспененных геополимеров на основе горелой породы отвалов угольных шахт показали, что наилучшими механическими свойствами обладают образцы геополимерных материалов, приготовленные с использованием 14М раствора ортофосфорной кислоты при соотношении масс активатора к алюмосиликатному прекурсор равному 0,475. Измеренная ранняя прочность на сжатие таких образцов составляет 8,13 МПа. Подобранный оптимальный состав для синтеза геополимеров на основе горелой породы отвалов угольных шахт, вспененных при воздействии СВЧ электромагнитного поля, использован в последующем параметрическом исследовании по подбору температурно-временных режимов процесса синтеза [28-30].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что оптимальным составом для синтеза вспененных геополимеров на основе ЗШО с лучшими технологическими свойствами является состав, мас. %: золошлаковая смесь – 76, силикат натрия – 19, гидроксид натрия – 3, алюминиевый порошок – 2, вода (сверх 100 %) – 6.

Оптимальным составом для синтеза вспененных геополимеров на основе горелой породы отвалов угольных шахт

с лучшими технологическими свойствами является состава, мас. %: горелая порода отвалов угольных шахт – 67,8, водный раствор ортофосфорной кислоты (14М) – 32,2 при соотношении масс активатора к алюмосиликатному прекурсор равному 0,475.

Полученные результаты в данной работе открывают перспективы практического применения геополимерной технологии в строительстве, позволяя эффективно использовать золошлаковые отходы, тем самым способствуя сохранению окружающей среды и экономической устойчивости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Chukaeva M.A. Complex processing of high-carbon ash and slag waste / M.A. Chukaeva, V.A. Matveeva, I.P. Sverchkov // J. Min. Inst. – 2022. – vol. 253, is. 1. – P. 97-104.
2. Yatsenko E.A. Recycling Ash and Slag Waste from Thermal Power Plants to Produce Foamed Geopolymers / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, A.I. Izvarin, V.M. Kurdashov, V.A. Smoliy, A.V. Ryabova, L.V. Klimova // Energies. – 2023. – vol. 16, is. 22. – 7535.
3. Яценко Е.А. Влияние порообразующих добавок на технологические свойства функциональных геополимерных материалов строительного назначения / Е.А. Яценко, Н.А. Вильбицкая, А.И. Изварин, В.М. Курдашов, В.Д. Ткаченко, А.А. Тимофеева // Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2023: материалы международной научно-практической конференции, Ялта, 16–19 мая 2023 года. – Симферополь, 2023. – С. 14-17.
4. Jia G. Preparation and characterization of aerogel expanded perlite composite as building thermal insulation material / G. Jia, Z. Li, P. Liu, Q. Jing. // J. Non. Cryst. Solids. – 2018. – vol. 482, is. – P. 192-202.
5. Ryabov Y.V. Methods for beneficiation of ash and slag waste from coal-fired thermal power plants and ways for their commercial use (a review) / Y.V. Ryabov, L.M. Delitsyn, N.N. Ezhova, S.V. Sudareva // Therm. Eng. Springer. – 2019. – vol. 66. – P. 149-168.
6. Ерошкина Н.А. Ресурсо-и энергосберегающие технологии строительных материалов на основе минерально-щелочных и геополимерных вяжущих: учеб. пособие / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 156 с.
7. Яценко Е.А. Конструкционные геополимерные материалы на основе отходов угольной энергетики / Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, Л.А. Яценко, А.И. Изварин // XII Международное Курнаковское совещание по физико-химическому анализу : сборник статей, Санкт-Петербург, 27–29 сентября 2022 года. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 90-92.
8. Изварин А.И. Исследование отходов угольной энергетики в качестве прекурсора для синтеза геополимеров / А.И. Изварин, Е.А. Яценко, С. Чаудхари, А.А. Тимофеева, А.В. Рябова, А.И. Старовойтов, В.М. Курдашов // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология: Сборник докладов Международной научной конференции, Алушта-Белгород, 05-09 июня 2023 года. – Белгород, 2023. – С. 214-219.

9. Яценко Е.А. Исследование структуры и свойств вспененных геополлимерных материалов на основе отходов твердотопливной энергетики / Е.А. Яценко, А.И. Изварин, С. Чаудхари, В.С. Яценко // Вестник современных технологий. – 2023. – № 4(32). – С. 35-40.
10. Testa M. Long-term sustainability from the perspective of cullet recycling in the container glass industry: Evidence from Italy / M. Testa, O. Malandrino, M.R. Sessa, S. Supino, D.Sica // Sustainability. – 2017. – vol. 9, is.10. – 1752.
11. Al Bakri Abdullah M.M. Optimization of alkaline activator/fly ash ratio on the compressive strength of manufacturing fly ash-based geopolymer/ M. M. Al Bakri Abdullah, H. Kamarudin, O. A.Abdulkareem, C. Ghazali, A.R.Rafiza, M. Norazian // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – vol. 110. – P. 734-739.
12. Hardjito D. Study on engineering properties of fly ash-based geopolymer concrete. / D. Hardjito, S.E. Wallah // Journal of the Australian Ceramic Societ. – 2002.
13. Novais R.M. Novel porous fly-ash containing geopolymer monoliths for lead adsorption from wastewaters / R.M. Novais, L.H. Buruberry, M.P. Seabra, J.A. Labrincha // J. Hazard. Mater. – 2016. – vol. 318. – P. 631-640.
14. Masi G.A comparison between different foaming methods for the synthesis of light weight geopolymers / G. Masi, W.D. Rickard, L. Vickers, M.C. Bignozzi, A. Van Riessen // Ceram. Int. – 2014. – vol. 40, is. 9. – P.13891-13902.
15. Guerrieri M. Behavior of combined fly ash/slag-based geopolymers when exposed to high temperatures / M. Guerrieri, J.G. Sanjayan // Fire Mater. An Int. J. – 2010. – vol. 34, is. 4. – P. 163-175.
16. Yao X. Geopolymerization process of alkali--metakaolinite characterized by isothermal calorimetry / X. Yao, Z. Zhang, H. Zhu, Y. Chen // Thermochim. Acta. – 2009. – vol. 493, is. 1-2. – P. 49-54.
17. Zhang Z.H. Geopolymer from kaolin in China: An overview/ Z.H. Zhang, H.J. Zhu, C.H. Zhou, H. Wang // Appl. Clay Sci. – 2016. vol. 119. – P. 31-41.
18. Abdullah M.M.A. Chemical reactions in the geopolymerisation process using fly ash-based geopolymer: A review / M.M.A. Abdullah, K. Hussin, M. Bnhussain, K.N. Ismail, M.I. Ahmad // Aust. J. Basic Appl. Sci. – 2011. – vol. 5. – P. 1199-1203.
19. Rattanasak U. Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer / U. Rattanasak, P. Chindaprasirt // Miner. Eng. – 2009. – vol. 22, is. 12. – P. 1073-1078.
20. Heah C.Y. Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers / C.Y. Heah, H. Kamarudin, A.M. Al Bakri, M. Bnhussain, M. Luqman, I.K. Nizar, Y.M. Liew // Constr. Build. Mater. – 2012. – vol. 35. – P. 912-922.
21. Panias D. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers / D. Panias, I. P. Giannopoulou, T. Perraki // Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. – 2007. – vol. 301, is 1-3. – P. 246-254.
22. Liew Y.M. Influence of solids-to-liquid and activator ratios on calcined kaolin cement powder/ Y.M Liew, H. Kamarudin, A.M. Al Bakri, M. Binhussain, M. Luqman, I.K. Nizar, C.Y. Heah // Phys. Procedia. – 2011. – vol. 22. – P. 312-317.
23. Fernández-Jiménez A. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder/ A. Fernández-Jiménez, A. Palomo //Effect of the activator. – 2005. vol. 35. – P. 1984-1992.
24. Lee W Effects of anions on the formation of aluminosilicate gel in geopolymers / W. Lee, Deventer J.J. // Ind. Eng. Chem. Res. – 2002. – vol. 41, is 18. – P. 4550-4558.
25. Lee W. Use of infrared spectroscopy to study geopolymerization of heterogeneous amorphous aluminosilicates / W. Lee, Deventer J.J. // Langmuir. – 2003. – vol. 19, is 21. – P. 8726-8734.
26. Chukanov N.V. Infrared spectra of mineral species: extended library. Springer Science / N. V. Chukanov // Business Media. – 2013.
27. Fernández-Jiménez A., Palomo A. Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure / A. Fernández-Jiménez, A. Palomo // Microporous mesoporous Mater. – 2005. – vol. 86, is 1-3. – P. 207-214.
28. Khan M.I. A Short Review of Infra-Red Spectroscopic Studies of Geopolymers / M.I. Khan, K.A. Azizli, S.Sufian, Z. Man, A.S. Khan, H. Ullah , A.A. Siyal // Adv. Mater. Res. – 2016. – vol. 1133. – P. 231-235.
29. Rüscher C.H. Weakening of alkali-activated metakaolin during aging investigated by the molybdatemethod and infrared absorption spectroscopy / C.H. Rüscher, E. Mielcarek, W. Lutz, A. Ritzmann, W.M. Kriven // J. Am. Ceram. Soc. – 2010. – vol. 93, is 9. – P. 2585-2590.
30. Rees C.A. Attenuated total reflectance fourier transform infrared analysis of fly ash geopolymer gelatingm / C.A. Rees, J.L. Provis, G.C. Lukey, J.S. van Deventer // Langmuir. – 2007. – vol. 23, is 15. – P. 8170-8179.

# Selection of an Activator for the Synthesis of Foamed Geopolymers Based on Solid Fuel Energy Waste

Smoliy V.A., Golovko D.A., Vilbitskaya N.A., Mirgorodsky A.I., Starovoitov A.I.

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

Novocherkassk, Russian Federation

[dima.golovko.9898@mail.ru](mailto:dima.golovko.9898@mail.ru)

**Abstract.** In this work, activating additives affecting the porous structure and properties of foamed geopolymers based on ash and slag waste have been studied. The influence of the activators on the structure and technological properties of porous geopolymer materials has been studied. The existing activators are considered. The technology of obtaining foamed geopolymers from various activators is described. The method of investigation of physical and mechanical properties is shown. The influence of activators on the structure and technological properties of porous geopolymer ma-

terials has been studied. The appearance, macro- and macrostructure of the obtained samples were studied. As a result of the research, it was found that the best operational properties are possessed by a sample based on sodium hydroxide 3% and sodium silicate 19% with a density of 335 kg/m<sup>3</sup>, thermal conductivity of 0.0748 W/(m·K) and compressive strength of 0.55 MPa.

**Keywords:** alkaline activation, porous geopolymers, thermal insulation, recycling, ash and slag waste.

## Библиографическое описание статьи

Смолий В.А. Выбор активатора для синтеза вспененных геополимеров на основе отходов твердотопливной энергетики / В.А. Смолий, Д.А. Головко, Вильбицкая Н.А., А.И. Миргородский, А.И. Старовойтов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2024. – Т.11, №4. – С. 82-87. DOI: 10.24892/RIJIE/20240414

## Reference to article

Smoliy V.A., Golovko D.A., Vilbitskaya N.A., Mirgorodsky A.I., Starovoitov A.I. Selection of an activator for the synthesis of foamed geopolymers based on solid fuel energy waste, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2024, vol.11, no.4, pp. 82-87. DOI: 10.24892/RIJIE/20240414