

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-85-95

Изварин А.И.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
E-mail: andre.izvarin@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ГИДРОКСИДА НАТРИЯ НА СВОЙСТВА ВСПЕНЕННЫХ ГЕОПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ТВЕРДОТОПЛИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Аннотация. Получение вспененных геополимерных материалов на основе золошлаковых отходов и породы терриконов позволит улучшить экологическую и экономическую ситуацию. Геополимеры представляют собой неорганические алюмосиликатные полимеры, получаемые щелочной активацией алюмосиликатного сырья. Содержание гидроксидов в реакционной системе является очень важным параметром при разработке геополимеров. Варьирование их содержания существенно изменяет степень полимеризации растворенных веществ в реагирующей системе, а также влияет на интенсивность выделения вспенивающего газа. В данной работе произведен выбор оптимального количества гидроксида натрия для синтеза вспененных геополимеров на основе золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС, золошлаковых отходов Луганской ТЭС, породы террикона шахты № 21 г. Краснодона и породы террикона шахты имени В.И. Ленина г. Новошахтинска. Для исследования влияния содержания гидроксида натрия на свойства вспененного геополимерного материала было выбрано его содержание от 0 до 7,5 масс. %. Установлены оптимальные концентрации гидроксида натрия, которые обеспечивают эффективное получение вспененных геополимерных материалов из различных отходов твердотопливной энергетики. Исследования показали, что содержание гидроксида натрия играет ключевую роль в формировании структуры и свойств геополимеров.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, порода терриконов, утилизация, геополимер, вспенивание.

Введение. В Российской Федерации наблюдается серьезная проблема, связанная с утилизацией отходов, возникающих в результате работы угольных электростанций [1, 2]. Ежегодное образование золошлаковых отходов превышает 22 миллиона тонн, при этом перерабатывается только десятая часть от общего объема [3]. Ситуация усугубляется тем, что на территории страны уже накоплено от 1,4 до 1,8 миллиарда тонн подобных отходов, которые занимают площадь свыше 28000 га [4]. Золошлакоотвалы представляют собой сложные гидротехнические сооружения, оснащенные системой дамб и трубопроводов для транспортировки отходов. Их расположение вблизи энергетических объектов и жилых зон создаёт потенциальные угрозы для окружающей среды и населения, что требует особого внимания к вопросам экологической безопасности [5].

Также существенной проблемой угледобывающей промышленности является массовое образование вскрышных, пустых пород. Количество такой породы от общего объема добываемого угля составляет 10 – 20 %. При этом совокупный объем накопленных отходов превышает 10,7 млрд тонн и продолжает расти [6]. Основным способом хранения породы являются терриконы – искусственные насыпи, которые занимают обширные территории, приводя к безвоз-

ратной потере плодородных земель и необратимым изменениям природного ландшафта. Кроме того, вредные вещества, содержащиеся в их составе, приводят к загрязнению окружающей среды [7].

В связи с этим поиск новых методов утилизации золошлаковых отходов и породы терриконов становится актуальным [8, 9]. Благодаря тому, что в составе материалов присутствует значительное количество аморфной алюмосиликатной составляющей, а также их способности к тонкому измельчению до высокодисперсного состояния, золошлаковые отходы и породы терриконов демонстрируют большой потенциал в качестве исходного сырья для создания нового типа материалов – геополимеров [10]. Геополимеры представляют собой неорганические алюмосиликатные полимеры, получаемые щелочной активацией алюмосиликатного сырья [11]. Вспененные геополимерные материалы привлекают все большее внимание благодаря высокой механической прочности, устойчивости к высоким температурам, низкой теплопроводности и экологичности [12]. Кроме того, температура, используемая для получения геополимеров, ниже 100 °C, и, следовательно, производство геополимеров является энергосберегающим и экономически выгодным.

Развитие технологии геополимерных материалов предоставляет значительные шансы для

уменьшения углеродного следа в строительной отрасли. Это достигается благодаря существенному сокращению использования природных минеральных ресурсов и при получении геополимерных материалов отсутствует стадия обжига. [13]. Такой подход позволяет снизить зависимость строительной индустрии от добычи новых минеральных ресурсов и эффективно использовать уже существующие промышленные отходы. Благодаря этому становится возможным значительное сокращение выбросов углекислого газа.

Для синтеза вспененных геополимерных материалов, в отличии от традиционных пористых материалов, необходимо присутствие в сырьевой смеси значительного количества щелочного активатора. В качестве активаторов используют растворы гидроксида натрия и силиката натрия [14]. При этом гидроксид натрия и силикат натрия редко используют в качестве самостоятельных активирующих единиц [15]. Содержание гидроксидов в реакционной системе является очень важным параметром при разработке геополимерных материалов. Варьирование их содержания существенно изменяет степень полимеризации растворенных веществ в реагирующей системе. Тем самым они определяют макро- и микроструктуру получаемого материала [16,17].

Механизм щелочной активизации представляет собой сложный процесс, который начинается с растворения алюмосиликатных частиц. В ходе этого процесса происходит последовательная поликонденсация растворенных частиц [18].

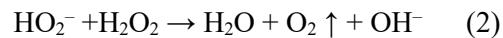
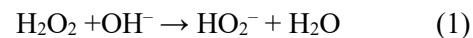
Свойства вспененных геополимерных материалов, полученных с различным содержанием гидроксида натрия

| Материал | Содержание NaOH, масс. % | Плотность, кг/м ³ | Прочность, МПа | Ссылка на источник |
|-------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------|--------------------|
| Метакаолин + зола-уноса | 4-5 | 440 | 0,26 | [19] |
| Зола-уноса | 6 | 640 | 0,42 | [20] |
| Зола-уноса + шлак | 2,3 | 351 | 0,50 | [21] |
| Метакаолин | 5,5 | 800 | - | [22] |
| Зола-уноса | 10,2 | 610 | 2,9 | [23] |
| Зола-уноса | 3,9 | 580 | 2,6 | [24] |
| Пустая порода + шлак | 3 | 485 | 1,39 | [25] |

Таким образом, в табл. 1 показано, что при использовании различных сырьевых материалов для синтеза вспененных геополимеров используется разное содержание гидроксида натрия и в настоящее время не определено оптимальное количество гидроксида натрия в сырьевой смеси для получения вспененных геополимеров. В связи с вышеизложенным в данной работе будет произведен подбор оптимального содержания гидроксида натрия в сырьевой смеси для получения вспененных геополимерных материалов на

Когда кремний-кислородные ($[SiO_4]^{4-}$) и алюминий-кислородные ($[AlO_4]^{5-}$) частицы оказываются в щелочной среде, они вступают в реакцию полимеризации. На первом этапе происходит их объединение в олигомеры с химической формулой Al-O-Si. Затем происходит формирование аморфного геля гидрата алюмосиликата натрия. В результате данного процесса происходит структурирование материала, что способствует образованию конечного геополимерного продукта с улучшенными физико-химическими свойствами.

Вспенивание геополимеров осуществляется за счет добавления в сырьевую смесь порообразователя. Наиболее известным порообразователем для геополимеров является пероксид водорода (H_2O_2). H_2O_2 в присутствии щелочи распадается на воду и вспенивающий газ кислород согласно уравнениям (1) и (2).



В табл. 1 приведены свойства вспененных геополимерных материалов, полученных с различным содержанием гидроксида натрия в сырьевой смеси, встречающихся в литературе. Количество гидроксида натрия, представленное в таблице, было пересчитано из растворенного состояния в сухое порошкообразное.

Таблица 1

основе золошлаковых отходов и породы террикона.

Материалы и методы. Основным сырьевым материалом для получения вспененных геополимеров являлись: золошлаковые отходы Новочеркасской ГРЭС (ЗШО Н), золошлаковые отходы Луганской ТЭС (ЗШО Л), порода террикона шахты № 21 г. Краснодона (порода К) и порода террикона шахты имени В.И. Ленина г. Новошахтинска (порода Н). Химический состав основных сырьевых материалов представлен в

табл. 2. В качестве активирующего раствора использовалась смесь гидроксида натрия и жидкого стекла, в качестве порообразователя – 30 % раствор пероксида водорода.

Результаты химического анализа показали, что преобладающими оксидами в составе всех материалов являются SiO_2 , Al_2O_3 . Присутствие этих соединений указывает на то, что данные материалы являются алюмосиликатами и пригодны

для синтеза геополимеров [1]. Кроме того, в их составе присутствует значительное количество Fe_2O_3 , который положительно влияет на прочностные свойства геополимеров [26]. Также известно, что при взаимодействии Fe_2O_3 с водой при $\text{pH} > 12$ образуется ион OH^- , который участвует в геополимеризации [18] (3):

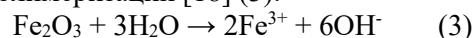


Таблица 2

Химический состав отходов твердотопливной энергетики

| Отход | SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | MgO | Na_2O | K_2O | CaO | TiO_2 | MnO | P_2O_5 | SO_3 | ППП |
|----------|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|-----------------------|----------------------|--------------|----------------|--------------|------------------------|---------------|------|
| ЗШО Н | 51,3 | 18,8 | 10,3 | 2,1 | 0,9 | 3,0 | 3,1 | 0,8 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 9,2 |
| ЗШО Л | 53,2 | 20,0 | 14,6 | 1,5 | 0,9 | 3,3 | 2,6 | 0,8 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 2,8 |
| Порода К | 27,9 | 12,5 | 6,1 | 0,6 | 0,3 | 3,0 | 0,4 | 0,7 | 0,0 | 0,1 | 2,3 | 46,1 |
| Порода Н | 37,2 | 15,9 | 10,1 | 0,6 | 0,8 | 3,1 | 0,3 | 0,8 | 0,1 | 0,2 | 1,7 | 29,2 |

Также при определении химического состава, установлено, что в составе ЗШО Н содержится 9,2 % потерь при прокаливании (ППП), то есть потери массы при нагревании до 1000 °C, а в составе ЗШО Л 2,8 %. Это связано с тем, что улетучивается гигроскопическая влага, химически связанный вода, CO_2 (за счет термического разложения компонентов ЗШО) и другие летучие

продукты [27]. В составе породы К и породы Н содержится 46,1 % и 29,2 % ППП соответственно, что связано с содержанием угля в породах.

С целью изучения фазового состава отходов твердотопливной энергетики был проведен рентгенофазовый анализ, который представлен на рис. 1.

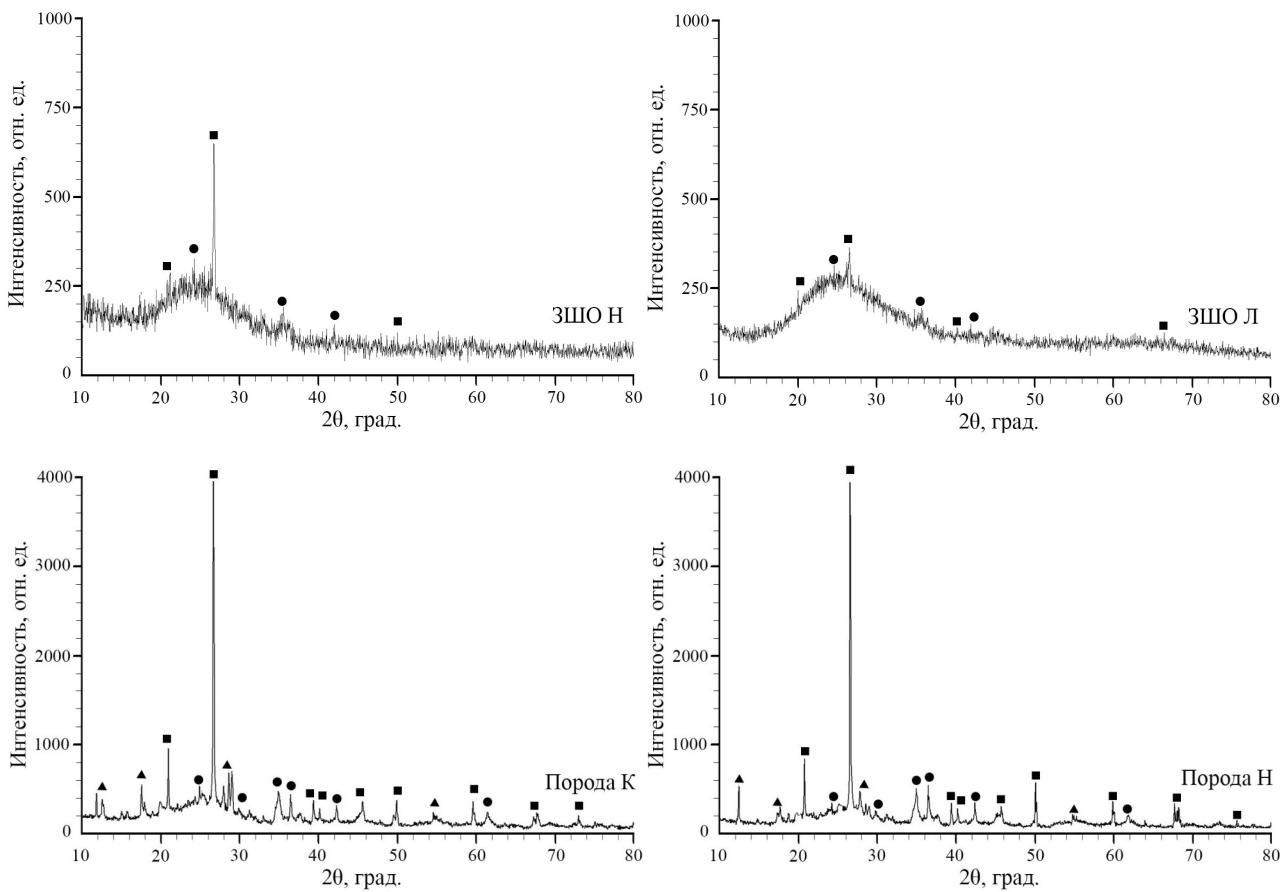


Рис. 1. Рентгенограммы отходов твердотопливной энергетики:

□ – кварц (SiO_2), ○ – гематит (Fe_2O_3), Δ – алюмосиликат натрия ($\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}$)

Анализ полученных данных показывает, что рентгенограммы, полученные для золошлаковых отходов, характеризуются более выраженным

рентгеноаморфным характером по сравнению с образцами пород терриконов, что связано с плав-

лением частиц золошлаковых отходов при сжигании угля. Основными фазами во всех отходах являются SiO_2 и Fe_2O_3 . В составе породы К и породы Н обнаружена кристаллическая фаза алюмосиликата натрия. Также во всех рентгенограммах присутствует «гало» в диапазоне 20–32° (2θ), что означает наличие аморфной фазы.

Технология получения вспененных геополимерных материалов включала несколько последовательных этапов. На начальном этапе был приготовлен раствор гидроксида натрия путём смешивания порошка NaOH с дистиллированной водой. Добавление воды обеспечивало необходимую текучесть смеси. После приготовления рас-

твора гидроксида натрия его смешивали с жидким стеклом и добавляли в него навеску отходов твердотопливной энергетики (ЗШО Н, ЗШО Л, Порода К, Порода Н). После этого в смесь вводили порообразователь – 30 % раствор пероксида водорода и тщательно перемешивали. На завершающей стадии приготовленные составы разливали в заранее подготовленные формы. Формы с материалом помещали в сушильный шкаф, где происходило отверждение при постоянной температуре 80 °С в течение 12 часов. Этот температурный режим обеспечивал оптимальные условия для завершения химических реакций и формирования конечной структуры геополимерного материала. Компонентный состав сырьевой смеси представлен в табл. 3.

Таблица 3

Компонентный состав сырьевой смеси на основе отходов твердотопливной энергетики, масс. %

| № | ЗШО Н | ЗШО Л | Порода К | Порода Н | 30 % H_2O_2 | Жидкое стекло | NaOH , сверх 100 % | H_2O , сверх 100 % |
|-----|-------|-------|----------|----------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 1.1 | 75 | - | - | - | 2 | 23 | - | 8 |
| 1.2 | 75 | - | - | - | 2 | 23 | 1,25 | 8 |
| 1.3 | 75 | - | - | - | 2 | 23 | 2,5 | 8 |
| 1.4 | 75 | - | - | - | 2 | 23 | 5 | 8 |
| 1.5 | 75 | - | - | - | 2 | 23 | 7,5 | 8 |
| 2.1 | - | 75 | - | - | 2 | 23 | - | 8 |
| 2.2 | - | 75 | - | - | 2 | 23 | 1,25 | 8 |
| 2.3 | - | 75 | - | - | 2 | 23 | 2,5 | 8 |
| 2.4 | - | 75 | - | - | 2 | 23 | 5 | 8 |
| 2.5 | - | 75 | - | - | 2 | 23 | 7,5 | 8 |
| 3.1 | - | - | 75 | - | 2 | 23 | - | 16 |
| 3.2 | - | - | 75 | - | 2 | 23 | 1,25 | 16 |
| 3.3 | - | - | 75 | - | 2 | 23 | 2,5 | 16 |
| 3.4 | - | - | 75 | - | 2 | 23 | 5 | 16 |
| 3.5 | - | - | 75 | - | 2 | 23 | 7,5 | 16 |
| 4.1 | - | - | - | 75 | 2 | 23 | - | 16 |
| 4.2 | - | - | - | 75 | 2 | 23 | 1,25 | 16 |
| 4.3 | - | - | - | 75 | 2 | 23 | 2,5 | 16 |
| 4.4 | - | - | - | 75 | 2 | 23 | 5 | 16 |
| 4.5 | - | - | - | 75 | 2 | 23 | 7,5 | 16 |

Рентгенофазовый анализ отходов твердотопливной энергетики проводился в ЦКП «Нанотехнологии» ЮРГПУ (НПИ) на рентгеновском порошковом дифрактометре ARLX'TRA (Thermo Fisher Scientific, Уолтем, Массачусетс, США). Плотность вспененных геополимеров определялась как отношение массы к его объему. Прочность на сжатие образцов определялась на гидравлическом прессе марки ТП-1-350 «Универсал».

Основная часть. Для исследования влияния содержания гидроксида натрия на свойства вспененных геополимерных материалов было выбрано его содержание от 0 до 7,5 масс. %. Коли-

чество жидкого стекла во всех опытах было неизменно (23 масс. %) и оказывало одинаковое влияние на формирование вспененного геополимерного материала. Присутствие жидкого стекла в сырьевой смеси увеличивает скорость реакции геополимеризации и является ключевым для инициирования олигомеров, что, следовательно, облегчает поликонденсацию [28]. Также жидкое стекло действует как обогащающий агент для повышения щелочности и увеличения общей прочности, выступая в качестве связующего вещества или пластификатора [29].

На рис. 2 представлены структура и свойства полученных вспененных геополимерных материалов на основе ЗШО Н и ЗШО Л.

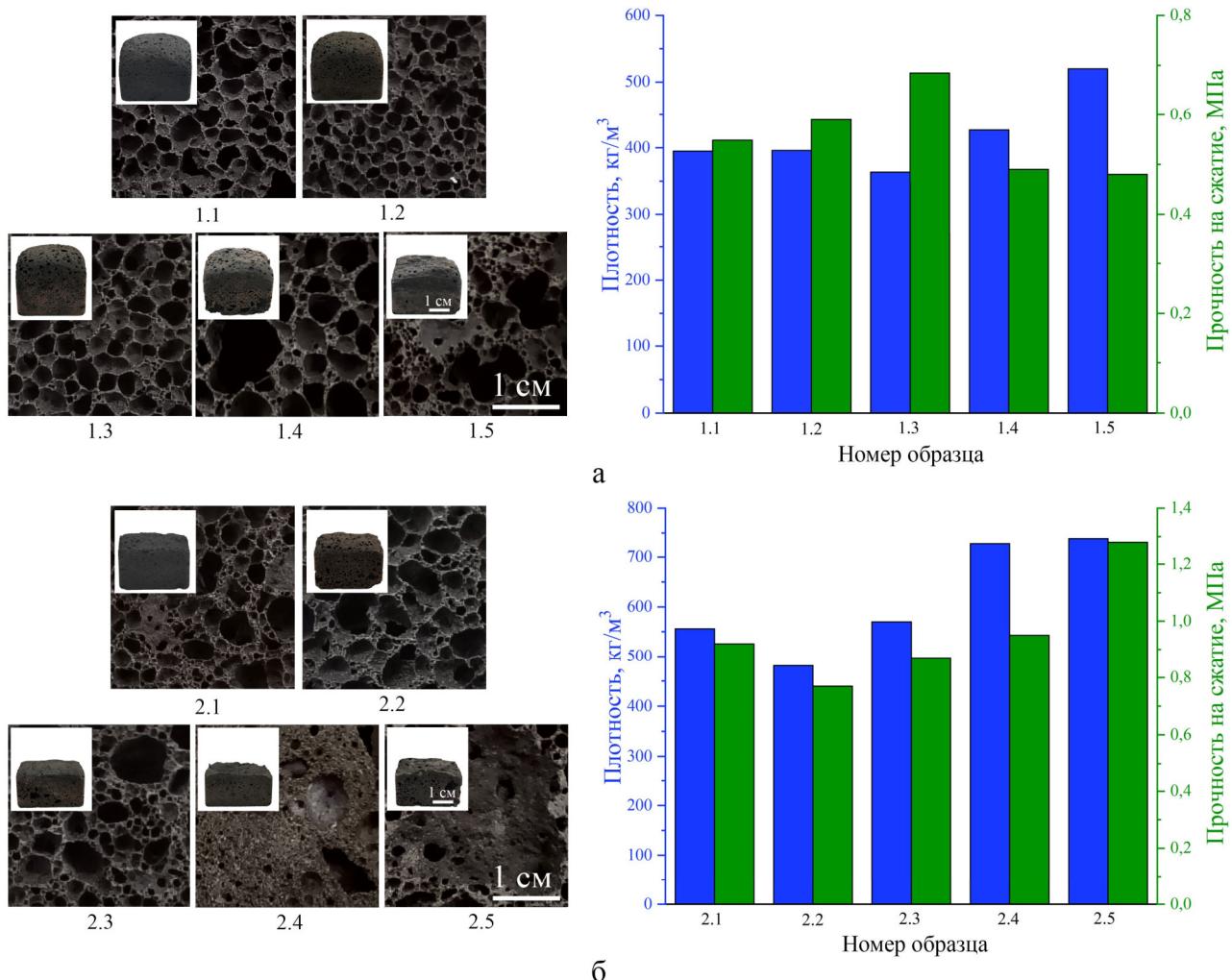


Рис. 2. Структура и свойства полученных вспененных геополимерных материалов с различным содержанием гидроксида натрия на основе а) ЗШО Н, б) ЗШО Л

Как видно из рис. 2а, при увеличении содержания гидроксида натрия для образцов на основе ЗШО Н с 0 до 1,25 масс. % (образцы 1.1, и 1.2) плотность практически не изменяется и составляет 396 кг/м³, при этом прочность на сжатие материала возрастает с 0,55 до 0,6 МПа. При увеличении содержания гидроксида натрия до 2,5 % (образец 1.3) прочность на сжатие увеличивается до 0,69 МПа, а плотность уменьшается до 342 кг/м³. Это объясняется тем, что с увеличением содержания гидроксида натрия в геополимере растворяется большее количество диоксида кремния и оксида алюминия и, следовательно, в образовании геополимерной структуры участвует большее количество ионов Si и Al [14]. Поскольку геополимеризация представляет собой процесс, протекающий в три этапа (диффузия, перенос и конденсация), при большой концентрации щелочи (образцы 1.4 и 1.5) основность системы становится слишком сильной, происходит

преждевременное разложение пероксида водорода до того, как реакционная система приобретает предел текучести, необходимый для капсулирования пор. Следовательно, поры не стабилизируются по мере их образования и очень велики (рис. 2а). В связи с этим происходит ухудшение как прочностных свойств у образцов 1.4 и 1.5, так и плотности. Таким образом наилучшими свойствами на основе ЗШО Н обладает образец, полученный с 2,5 масс. % гидроксида натрия.

Аналогичная ситуация наблюдается и у образцов, полученных на основе ЗШО Л (рис. 2б). При большой концентрации щелочи поры не стабилизируются по мере их образования и очень велики, что сказывается на их свойствах. У образцов 2.4 и 2.5 плотность более 700 кг/м³. Наименьшей плотностью обладает образец 2.2 – 481 кг/м³ при прочности на сжатие 0,77 МПа.

На рис. 3 представлены структура и свойства полученных вспененных геополимерных материалов на основе Породы К и Породы Н.

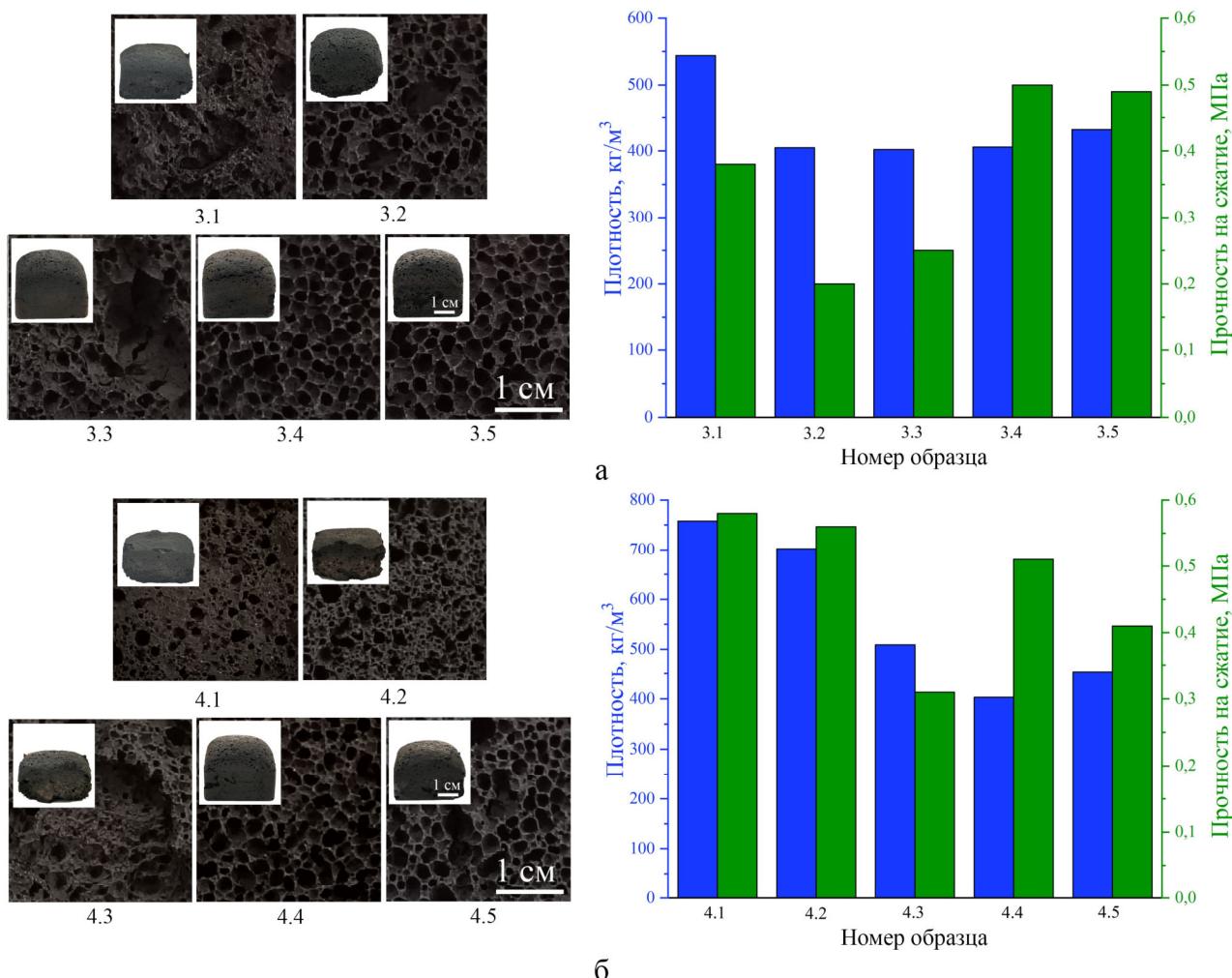


Рис. 3. Структура и свойства полученных вспененных геополимерных материалов с различным содержанием гидроксида натрия на основе а) Породы К и б) Породы Н

Как видно из рис. 3, при отсутствии в составе гидроксида натрия (образцы 3.1 и 4.1) и при его низком содержании (образцы 3.2 и 3.3, 4.2 и 4.3) не происходит формирование равномерной пористой структуры. Это связано с тем, что разложение H_2O_2 не происходит в полном объеме и предел текучести реакционной системы слишком высокий для равномерного распределения пор [30]. Образцы 3.4, 4.4 и 3.5, 4.5, полученные с 5 и 7,5 масс. %, обладают равномерной пористой структурой с размером пор 1–2 мм. Наилучшими прочностными свойствами из образцов, полученных на основе Породы К, обладают образцы 3.4 и 3.5 (0,5 МПа и 0,49 МПа, соответственно). При этом плотность у образца 3.4 меньше, чем у образца 3.5 ($406 \text{ кг}/\text{м}^3$ и $432 \text{ кг}/\text{м}^3$, соответственно). Образцы 3.1–3.3 обладают неприемлемыми технологическими свойствами вследствие своей неравномерной структуры. Таким образом, наилучшими свойствами на основе Породы К обладает образец, полученный с 5 масс. % гидроксида натрия.

Образцы на основе Породы Н при низком содержании щелочи менее подвержены вспениванию. У образцов 4.1 и 4.2 плотность $758 \text{ кг}/\text{м}^3$ и $702 \text{ кг}/\text{м}^3$, соответственно. Наилучшими свойствами обладает образец, также полученный с 5 масс. % гидроксида натрия. Его плотность составила $403 \text{ кг}/\text{м}^3$ при прочности на сжатие 0,51 МПа.

Таким образом, для достижения оптимальных пористой структуры и свойств геополимерного материала крайне важно осуществлять тщательный контроль над количеством добавляемого гидроксида натрия в реакционную смесь. Необходимо следить за тем, чтобы его содержание было достаточным для обеспечения требуемых характеристик, но при этом не избыточным. При недостаточном количестве гидроксида натрия процесс формирования пор может быть нарушен, что приводит к неоднородности структуры материала. В тоже время избыточное количество этого гидроксида натрия вызывает чрезмерное вспенивание и образование нестабильных пор, что также негативно сказывается на конечных свойствах материала.

Выводы.

1. Подтверждена возможность создания вспененных геополимерных материалов с использованием различных отходов твердотопливной энергетики. Эта технология открывает перспективы для утилизации отходов и получения новых материалов с улучшенными характеристиками. Благодаря использованию отходов в качестве сырья, можно не только снизить экологическую нагрузку, но и создать материалы для возможного применения в строительстве.

2. Установлены оптимальные содержания гидроксида натрия для получения вспененных геополимерных материалов из различных отходов твердотопливной энергетики:

– 2,5 масс. % для ЗШО Н (образец 1.3). Плотность образца составила 342 кг/м³, а прочность на сжатие 0,69 МПа.

– 1,25 масс. % для ЗШО Л (образец 2.2). Плотность образца составила 481 кг/м³, а прочность на сжатие 0,77 МПа.

– 5 масс. % для Породы К (образец 3.4). Плотность образца составила 406 кг/м³, а прочность на сжатие 0,5 МПа.

– 5 масс. % для Породы Н (образец 4.4). Плотность образца составила 403 кг/м³, а прочность на сжатие 0,51 МПа.

3. Полученные данные демонстрируют влияние содержания гидроксида натрия на физико-механические свойства вспененных геополимерных материалов, полученных из различных типов отходов. Оптимальное содержание щелочного компонента позволяет достичь баланса между плотностью и прочностью материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Menshov P.V., Khlupin Y.V., Nalesnik O.I., Makarovskikh A.V. Ash and slag waste as a secondary raw material // Procedia Chemistry. 2014. Vol. 10. Pp. 184–191. DOI: 10.1016/j.proche.2014.10.032.

2. Панишев Н.В., Бигеев В.А., Галиулина Е.С. Перспективы утилизации хвостов углеобогащения и твердых отходов тепловых электростанций // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 2(17). С. 69–77.

3. Petropavlovskaya V.B., Artamonova S.V., Shchipanskaya E.O., Ratkevich E.A., Petropavlovskii K.S. Environmental management in ash and slag waste management in Russia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2022. Vol. 1010, Iss. 1. 012135. DOI: 10.1088/1755-1315/1010/1/012135.

4. Макаренко С.В. Гонжитов А.Б., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Оценка влияния технологических факторов на свойства строительной керамики на основе золошлаковых смесей ТЭЦ ОАО

«Иркутскэнерго» // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 4(66). С. 233–240.

5. Яценко Е.А., Изварин А.И., Чандхари С., Яценко В.С. Исследование структуры и свойств вспененных геополимерных материалов на основе отходов твердотопливной энергетики // Вестник современных технологий. 2023. № 4(32). С. 35.

6. Vo T.L., Nash W., Del Galdo M., Rezania M., Crane R., Nezhad M.M., Ferrara L. Coal mining wastes valorization as raw geomaterials in construction: A review with new perspectives // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 336. 130213. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130213.

7. Yang L., Song J., Bai X., Song B., Wang R., Zhou T., Pu H. Leaching behavior and potential environmental effects of trace elements in coal gangue of an open-cast coal mine area, Inner Mongolia, China // Minerals. 2016. Vol. 6, Iss. 2. P. 50. DOI: 10.3390/min6020050.

8. Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Gilyazidinova N.V., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Skiba V.Y. Study of matrix and rare elements in ash and slag waste of a thermal power plant concerning the possibility of their extraction // Metallurgist. 2022. Vol. 65, Iss. 11. Pp. 1324–1330. DOI: 10.1007/s11015-022-01278-2.

9. Изварин А.И., Яценко Е.А., Изварина Д.Н. Исследование порообразования теплоизоляционного геополимера на основе золошлаковых отходов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2024. № 2. С. 77–82. DOI: 10.17213/1560-3644-2024-2-77-82.

10. Longos Jr A., Tigue A.A., Dollente I.J., Malenab R.A., Bernardo-Arugay I., Hinode H., Promentilla M.A. Optimization of the mix formulation of geopolymer using nickel-laterite mine waste and coal fly ash // Minerals. 2020. Vol. 10, Iss. 12. P. 1144. DOI: 10.3390/min10121144.

11. Ji Z. Li M., Su L., Pei Y. Porosity, mechanical strength and structure of waste-based geopolymer foams by different stabilizing agents // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 258. P. 119555. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119555.

12. Tian X., Liu K., Yang X., Jiang T., Chen B., Tian Z., Peng H. Synthesis of metakaolin-based geopolymer foamed materials using municipal solid waste incineration fly ash as a foaming agent // Waste Management. 2023. Vol. 169. Pp. 101–111. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.07.003

13. Ерошина Н.А., Коровкин М.О. Геополимерные строительные материалы на основе промышленных отходов: монография. Пенза: ПГУАС, 2014. 128 с.

14. Cho Y.K., Yoo S.W., Jung S.H., Lee K.M., Kwon S.J. Effect of Na₂O content, SiO₂/Na₂O molar ratio, and curing conditions on the compressive strength of FA-based geopolymers // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 145. Pp. 253–260. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.004.
15. Liew Y.M., Heah C.Y., Kamarudin H. Structure and properties of clay-based geopolymers cements: A review // Progress in Materials Science. 2016. Vol. 83. Pp. 595–629. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.002.
16. Hardjito D., Wallah S.E., Sumajouw D.M., Rangan B.V. Fly ash-based geopolymers concrete // Australian Journal of Structural Engineering. 2005. Vol. 6, Iss. 1. Pp. 77–86. DOI: 10.1080/13287982.2005.11464946.
17. Henon J., Alzina A., Absi J., Smith D.S., Rossignol S. Porosity control of cold consolidated geomaterial foam: temperature effect // Ceramics International. 2012. Vol. 38, Iss. 1. Pp. 77–84. DOI: 10.1016/j.ceramint.2011.06.040.
18. Abdullah M.M.A., Hussin K., Bnhussain M., Ismail K.N., Ahmad M.I. Chemical reactions in the geopolymersation process using fly ash-based geopolymers: A review // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011. Vol. 5. Pp. 1199–1203.
19. Novais R.M., Ascensão G., Buruberri L.H., Senff L., Labrincha J.A. Influence of Blowing Agent on the Fresh-and Hardened-State Properties of Lightweight Geopolymers // Materials & Design. 2016. Vol. 108. Pp. 551–559. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.07.039.
20. Hajimohammadi A., Ngo T., Mendis P., Sanjayan J. Regulating the Chemical Foaming Reaction to Control the Porosity of Geopolymer Foams // Materials & Design. 2017. Vol. 120. Pp. 255–265. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.02.026.
21. Gu G., Xu F., Ruan S., Huang X., Zhu J., Peng C. Influence of Precast Foam on the Pore Structure and Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Foams // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 256. 119410. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119410.
22. Yang T., Chou C.C., Chien C.C. The effects of foaming agents and modifiers on a foamed-geopolymer // The 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM'12) Seoul, Korea. 2012.
23. Ducman V., Korat L. Characterization of geopolymers fly-ash based foams obtained with the addition of Al powder or H₂O₂ as foaming agents // Materials characterization. 2016. Vol. 113. Pp. 207–213. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.01.019.
24. Korat L., Ducman V. The influence of the stabilizing agent SDS on porosity development in alkali-activated fly-ash based foams // Cement and Concrete Composites. 2017. Vol. 80. Pp. 168–174. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.03.010.
25. Zhao Z., Qu X., Li Z., He T., Li F. Preparation and characterization of geopolymers foamed concrete based on coal gangue and slag // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 455. 139187. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139187.
26. Zailani W.W.A., Abdullah M.M.A., Arshad M.F., Burduhos-Nergis D.D., Tahir M.F.M. Effect of iron oxide (Fe₂O₃) on the properties of fly ash based geopolymers // IOP conference series: materials science and engineering. IOP Publishing. 2020. Vol. 877, Iss. 1. 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/877/1/012017.
27. Beaino S., El Hage P., Sonnier R., Seif S., El Hage R. Novel foaming-agent free insulating geopolymers based on industrial fly ash and rice husk // Molecules. 2022. Vol. 27, Iss. 2. 531. DOI: 10.3390/molecules27020531.
28. Heah C.Y., Kamarudin H., Al Bakri A.M., Bnhussain M., Luqman M., Nizar I.K., Liew Y.M. Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 35. Pp. 912–922. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.102.
29. Liew Y.M., Kamarudin H., Al Bakri A.M., Binhussain M., Luqman M., Nizar I.K., Heah C.Y. Influence of solids-to-liquid and activator ratios on calcined kaolin cement powder // Physics Procedia. 2011. Vol. 22. Pp. 312–317. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.11.049.
30. Feng J., Zhang R., Gong L., Li Y., Cao W., Cheng X. Development of porous fly ash-based geopolymers with low thermal conductivity // Materials & Design (1980–2015). 2015. Vol. 65. Pp. 529–533. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.024.

Информация об авторах

Изварин Андрей Игоревич, аспирант, ассистент кафедры «Общая химия и технология силикатов». Е-mail: andre.izvarin@yandex.ru. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова Россия, 346428, Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

Поступила 09.07.2025 г.

© Изварин А.И., 2026

Izvarin A.I.
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
E-mail: andre.izvarin@yandex.ru

INFLUENCE OF SODIUM HYDROXIDE ON THE PROPERTIES OF FOAMED GEOPOLYMERS BASED ON SOLID FUEL ENERGY WASTE

Abstract. Development of new methods for utilization of ash and slag waste and waste heap rock will improve the ecological and economic situation. It is promising to obtain foamed geopolymers based on these wastes. Geopolymers are new inorganic three-dimensional aluminosilicate polymers obtained by alkaline activation of aluminosilicate raw materials. The content of hydroxides in the reaction system is a very important parameter in the development of geopolymers. Varying their content significantly changes the degree of polymerization of dissolved substances in the reacting system, and also affects the intensity of foaming gas release. In this work, the optimal amount of sodium hydroxide was selected for the synthesis of foamed geopolymers based on ash and slag waste of the Novocherkassk State District Power Plant, ash and slag waste of the Lugansk Thermal Power Plant, waste heap rock of Mine No. 21 in Krasnodon and waste heap rock of the V.I. Lenin Mine in Novoshakhtinsk. The chemical and phase compositions of the selected solid fuel energy wastes were studied, the results of which indicate that these materials belong to aluminosilicates and can be used to obtain geopolymers. To study the effect of sodium hydroxide content on the properties of foamed geopolymers, its content was selected from 0 to 7.5 wt %. Optimum concentrations of sodium hydroxide were established, which ensure the effective production of foamed geopolymers from various solid fuel energy wastes. Studies have shown that the content of sodium hydroxide plays a key role in the formation of the structure and properties of geopolymers.

Keywords: ash and slag waste, waste heap rock, recycling, geopolymers, foaming.

REFERENCES

1. Menshov P.V., Khlupin Y.V., Nalesnik O.I., Makarovskikh A.V. Ash and slag waste as a secondary raw material. *Procedia Chemistry*. 2014. Vol. 10. Pp. 184–191. DOI: 10.1016/j.proche.2014.10.032.
2. Panishev N.V., Bigeev V.A., Galiulina E.S. Perspectives of utilization of coal enrichment as well as thermoelectric plants wastes [Perspektivy utilizatsii khvostov ugleobogashcheniya i tverdykh otkhodov teplovyykh elektrostantsiy]. The theory and process engineering of metallurgical production. 2015. No 2(17). Pp. 69–77.
3. Petropavlovskaya V.B., Artamonova S.V., Shchipanskaya E.O., Ratkevich E.A., Petropavlovskii K.S. Environmental management in ash and slag waste management in Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2022. Vol. 1010, Iss. 1. 012135. DOI: 10.1088/1755-1315/1010/1/012135.
4. Makarenko S.V., Gonzhitov A.B., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. Assessment of the influence of technological factors on the properties of building ceramics based on ash and slag mixtures at the thermal power plant of «Irkutskenergo» [Otsenka vliyanija tekhnologicheskikh faktorov na svoystva stroitel'noj keramiki na osnove zoloshlakovykh smesey TETS OAO «Irkutskenergo»]. News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2023. No 4(66). Pp. 233–240.
5. Yatsenko E.A., Izvarin A.I., Chaudhary S., Yatsenko V.S. Study of the structure and properties of foamed geopolymers based on solid fuel energy waste [Issledovaniye struktury i svoystv vspenennykh geopolimernykh materialov na osnove otkhodov tverdotoplivnoy energetiki]. *Vestnik sovremennyyh tehnologij*. 2023. No 4 (32). 35. (rus)
6. Vo T.L., Nash W., Del Galdo M., Rezania M., Crane R., Nezhad M.M., Ferrara L. Coal mining wastes valorization as raw geomaterials in construction: A review with new perspectives. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 336. 130213. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130213.
7. Yang L., Song J., Bai X., Song B., Wang R., Zhou T., Pu H. Leaching behavior and potential environmental effects of trace elements in coal gangue of an open-cast coal mine area, Inner Mongolia, China. *Minerals*. 2016. Vol. 6, Iss. 2. 50. DOI: 10.3390/min6020050.
8. Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Gilyazidinova N.V., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Skiba V.Y. Study of matrix and rare elements in ash and slag waste of a thermal power plant concerning the possibility of their extraction. *Metallurgist*. 2022. Vol. 65, Iss. 11. Pp. 1324–1330. DOI: 10.1007/s11015-022-01278-2.
9. Izvarin A.I., Yatsenko E.A., Izvarina D.N. Research of pore formation of thermal insulating geopolymers based on ash and slag waste [Issledovaniye poroobrazovaniya teploizolyatsionnogo geopolimera na osnove zoloshlakovykh otkhodov]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Techn. nauki=Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2024. No 2. Pp. 77–82. DOI: 10.17213/1560-3644-2024-2-77-82. (rus).
10. Longos Jr A., Tigue A.A., Dollente I.J., Malenab R.A., Bernardo-Arugay I., Hinode H., Promentilla M.A. Optimization of the mix formulation

- of geopolymer using nickel-laterite mine waste and coal fly ash. *Minerals.* 2020. Vol. 10, Iss. 12. 1144. DOI: 10.3390/min10121144.
11. Ji Z., Li M., Su L., Pei Y. Porosity, mechanical strength and structure of waste-based geopolymers foams by different stabilizing agents. *Construction and Building Materials.* 2020. Vol. 258. 119555. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119555.
 12. Tian X., Liu K., Yang X., Jiang T., Chen B., Tian Z., Peng H. Synthesis of metakaolin-based geopolymers foamed materials using municipal solid waste incineration fly ash as a foaming agent. *Waste Management.* 2023. Vol. 169. Pp. 101–111. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.07.003.
 13. Eroshkina N.A., Korovkin M.O. Geopolymer building materials based on industrial waste [Geopolimernyye stroitel'nyye materialy na osnove promyshlennyykh otkhodov]. Penza: PSUAS, 2014. 128 p. (rus)
 14. Cho Y.K., Yoo S.W., Jung S.H., Lee K.M., Kwon S.J. Effect of Na₂O content, SiO₂/Na₂O molar ratio, and curing conditions on the compressive strength of FA-based geopolymers. *Construction and Building Materials.* 2017. Vol. 145. Pp. 253–260. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.004.
 15. Liew Y.M., Heah C.Y., Kamarudin H. Structure and properties of clay-based geopolymers cements: A review. *Progress in Materials Science.* 2016. Vol. 83. Pp. 595–629. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.002.
 16. Hardjito D., Wallah S.E., Sumajouw D.M., Rangan B.V. Fly ash-based geopolymers concrete. *Australian Journal of Structural Engineering.* 2005. Vol. 6, Iss. 1. Pp. 77–86. DOI: 10.1080/13287982.2005.11464946.
 17. Henon J., Alzina A., Absi J., Smith D.S., Rossignol S. Porosity control of cold consolidated geomaterial foam: temperature effect. *Ceramics International.* 2012. Vol. 38, Iss. 1. Pp. 77–84. DOI: 10.1016/j.ceramint.2011.06.040.
 18. Abdullah M.M.A., Hussin K., Bnhussain M., Ismail K.N., Ahmad M.I. Chemical reactions in the geopolymserisation process using fly ash-based geopolymers: A review. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences.* 2011. Vol. 5. Pp. 1199–1203.
 19. Novais R.M., Ascensão G., Buruberri L.H., Senff L., Labrincha J.A. Influence of Blowing Agent on the Fresh-and Hardened-State Properties of Lightweight Geopolymers. *Materials & Design.* 2016. Vol. 108. Pp. 551–559. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.07.039.
 20. Hajimohammadi A., Ngo T., Mendis P., Sanjayan J. Regulating the Chemical Foaming Reaction to Control the Porosity of Geopolymer Foams. *Materials & Design.* 2017. Vol. 120. Pp. 255–265. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.02.026.
 21. Gu G., Xu F., Ruan S., Huang X., Zhu J., Peng C. Influence of Precast Foam on the Pore Structure and Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Foams. *Construction and Building Materials.* 2020. Vol. 256. 119410. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119410.
 22. Yang T., Chou C.C., Chien C.C. The effects of foaming agents and modifiers on a foamed-geopolymer. The 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM'12) Seoul, Korea. 2012.
 23. Ducman V., Korat L. Characterization of geopolymers fly-ash based foams obtained with the addition of Al powder or H₂O₂ as foaming agents. *Materials characterization.* 2016. Vol. 113. Pp. 207–213. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.01.019.
 24. Korat L., Ducman V. The influence of the stabilizing agent SDS on porosity development in alkali-activated fly-ash based foams. *Cement and Concrete Composites.* 2017. Vol. 80. Pp. 168–174. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.03.010.
 25. Zhao Z., Qu X., Li Z., He T., Li F. Preparation and characterization of geopolymers foamed concrete based on coal gangue and slag. *Construction and Building Materials.* 2024. Vol. 455. 139187. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139187.
 26. Zailani W.W.A., Abdullah M.M.A., Arshad M.F., Burduhos-Nergis D.D., Tahir M.F.M. Effect of iron oxide (Fe₂O₃) on the properties of fly ash based geopolymers. IOP conference series: materials science and engineering. IOP Publishing. 2020. Vol. 877, Iss. 1. 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/877/1/012017.
 27. Beaino S., El Hage P., Sonnier R., Seif S., El Hage R. Novel foaming-agent free insulating geopolymers based on industrial fly ash and rice husk. *Molecules.* 2022. Vol. 27, Iss. 2. 531. DOI: 10.3390/molecules27020531.
 28. Heah C.Y., Kamarudin H., Al Bakri A.M., Bnhussain M., Luqman M., Nizar I.K., Liew Y.M. Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials.* 2012. Vol. 35. Pp. 912–922. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.102.
 29. Liew Y.M., Kamarudin H., Al Bakri A.M., Binhussain M., Luqman M., Nizar I.K., Heah C.Y. Influence of solids-to-liquid and activator ratios on calcined kaolin cement powder. *Physics Procedia.* 2011. Vol. 22. Pp. 312–317. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.11.049.
 30. Feng J., Zhang R., Gong L., Li Y., Cao W., Cheng X. Development of porous fly ash-based geopolymers with low thermal conductivity. *Materials & Design (1980-2015).* 2015. Vol. 65. Pp. 529–533. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.024.

Information about the authors

Izvarin Andrey Igorevich. Postgraduate student, assistant of the Department of «General Chemistry and Technology of Silicates». E-mail: andre.izvarin@yandex.ru. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Russia, 346428, Novocherkassk, Prosveshcheniya str., 132.

Received 09.07.2025

Для цитирования:

Изварин А.И. Влияние гидроксида натрия на свойства вспененных геополимеров на основе отходов твердотопливной энергетики // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 1. С. 85–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-85-95

For citation:

Izvarin A.I. Influence of sodium hydroxide on the properties of foamed geopolymers based on solid fuel energy waste. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 1. Pp. 85–95. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-85-95