

На правах рукописи



**Изварин Андрей Игоревич**

**РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ВСПЕНЕННЫХ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ  
ОТХОДОВ УГОЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ДОНБАССА**

2.6.14 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новочеркасск – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

**Научный руководитель Яценко Елена Альфредовна**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая химия и технология силикатов» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова

**Официальные оппоненты:** **Самченко Светлана Васильевна**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

**Шатохина Марина Алексеевна**  
кандидат технических наук, доцент кафедры защиты в чрезвычайных ситуациях федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

Защита состоится «25» июня 2026 г. в \_\_\_\_ часов на заседании Объединенного диссертационного совета 99.2.159.02 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» и Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова» по адресу: 125480, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, конференц-зал (ауд. 344).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», на официальном сайте организации <https://diss.muctr.ru/author/1164/> и на официальном сайте ВАК.

Автореферат разослан «\_\_» мая 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 99.2.159.02  
доктор химических наук, профессор



О.Б. Петрова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время уголь является одним из самых дешевых источников энергии. На долю угля в мировом производстве электроэнергии приходится около 40 %. При сжигании угля образуются золошлаковые отходы (ЗШО). Объем накопленных золошлаковых отходов в России составляет более 1,8 млрд тонн. Еще одной проблемой является образование огромного количества отходов и побочных продуктов при добыче угля – породы терриконов, ставшую крупнейшим по объемам образования индустриальным отходом в энергетическом комплексе. Объем накопленных отходов угледобычи в России оценивается в более чем 10,7 млрд тонн, и этот объем продолжает увеличиваться в связи с добычей полезных ископаемых. Донбасс, как исторически сложившийся угледобывающий регион, накопил около 1300 терриконов на площади 5500 га. При этом ежегодно на Донбассе образуется до 8 млн тонн отходов угледобычи.

Хранение золошлаковых отходов и породы терриконов представляет собой серьезную экологическую и экономическую проблему, так как они содержат вредные вещества и тем самым загрязняют окружающую среду. В настоящее время переработка данных отходов в России составляет не более 10 %.

Поиск путей утилизации таких отходов является весьма актуальным направлением исследований. ЗШО и порода терриконов по химическому и минералогическому составу в значительной степени идентично природному минеральному сырью и могут быть использованы как сырьевой материал при получении теплоизоляционных геополимерных материалов. В настоящее время наиболее распространены следующие теплоизоляционные материалы: 1. Полимерные органические материалы (пенополистирол, пенополивинилхлорид и т.д.), которые обладают низкой огнестойкостью, недолговечностью и при горении образуют токсичные вещества. 2. Неорганические материалы (минераловатные (базальтовые) утеплители и пеностекло). Минераловатные утеплители крайне гигроскопичны, вследствие чего теряют изоляционные свойства за 10 – 15 лет, а пеностекло обладает высокой стоимостью.

Получение вспененных геополимерных материалов на основе отходов угольной энергетики позволит реализовывать концепцию зеленого строительства, повысить энергоэффективность зданий и сооружений, расширить сырьевую базу строительной отрасли, утилизировать отходы, улучшить экологическую ситуацию.

Результаты работы получены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания на проведение НИР «Фундаментальные основы технологий рециклинга отходов нефтедобывающей отрасли Арктической зоны Российской Федерации с получением эффективных строительных материалов и расклинивающих агентов» (шифр «FENN-2025-0001»); в рамках стипендии Президента РФ для аспирантов и адъюнктов (приказ Минобрнауки РФ № 456 от 28.05.2025 г.); в рамках гранта Правительства РФ (Постановления № 220, соглашение № 075-15-2022-1111); в рамках гранта программы «Умник» Фонда содействия инновациям (договор №19037ГУ/2023).

## Степень разработанности темы

Исследования в области получения геополимерных и вспененных материалов, а также утилизации отходов угольной энергетики проводились научными коллективами: Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева (Сигаев В.Н., Потапова Е.Н., Клименко Н.Н. и др), Московского государственного строительного университета (Самченко С.В. и др.), Санкт-Петербургского государственного технологического института (технический университет) (Брыков А.С. и др.), Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (Минько Н.И., Бессмертный В.С., Пучка О.В., Строкова В.В. и др.), Национального исследовательского Томского политехнического университета (Верещагин В.И., Казьмина О.В. и др.), Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева (Калинкин А.М., Калинкина Е.В. и др.), Пензенского государственного университета архитектуры и строительства (Ерошкина Н.А., Коровкин М.О. и др.), Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (Яценко Е.А., Гольцман Б.М. и др.). Решением, не применяемым ранее, является разработка технологии получения вспененных геополимерных материалов на основе золошлаковых отходов и породы терриконов.

**Целью работы** является разработка ресурсосберегающей технологии вспененных геополимерных материалов на основе отходов угольной энергетики Донбасса.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

– Определение химического, фазового составов и радиологических свойств выбранных отходов угольной энергетики Донбасса.

– Исследование влияния вида и соотношения компонентов активирующей смеси и порообразующих добавок на структуру и свойства вспененных геополимерных материалов.

– Исследование механизма формирования вспененных геополимерных материалов.

– Разработка технологической схемы получения вспененных геополимерных материалов на основе отходов угольной энергетики Донбасса.

## Научная новизна работы

1. Разработаны научно-обоснованные технологические решения для получения вспененных геополимерных материалов на основе отходов угольной энергетики Донбасса (золошлаковые отходы и породы терриконов). Впервые для данного вида сырья с использованием активирующего раствора «NaOH-жидкое стекло» и раствора  $H_2O_2$  установлены закономерности протекания реакции геополимеризации и вспенивания, где гидроксид натрия способствует активации алюмосиликатных компонентов отходов и разложению пероксида водорода. Присутствие жидкого стекла обеспечивает стабилизацию пены и протекание реакции геополимеризации, поставляя в смесь олигомеры Si–O–Si. Пероксид водорода используется в качестве порообразователя, причём его разложение должно быть строго синхронизировано с процессом геополимеризации. Это обеспечивает эффективность реализации производства теплоизоляционных материалов с плотностью 272 – 278 кг/м<sup>3</sup> и коэффициентом теплопроводности 0,081 – 0,082 Вт/(м·К).

2. Установлено, что увеличение соотношения  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  в химическом составе сырья с 2,41 до 2,72 для золошлаковых отходов и с 2,34 до 2,49 для породы терриконов в химическом составе сырья обеспечивает равномерность процесса вспенивания геополимерного геля в объеме в течение 90 секунд до схватывания смеси и дополнительно повышает прочность затвердевшего геополимера на 12 – 13 % при снижении плотности на 7 – 8 %.

3. Показано, что повышение количества в исходном сырье примесей (в частности, остаточного углерода) и уменьшение содержания аморфной фазы обуславливает снижение прочности геополимерного материала за счет низкой реакционной способности и адсорбции на поверхности частиц угля молекул жидкого стекла, щелочи и воды. Это обуславливает необходимость введения большего количества щелочи для активации сырья (6 мас. % для породы, что в 2 раза больше, чем у образцов на основе ЗШО).

4. Установлены оптимальные значения содержания  $\text{NaOH}$  (3 мас. % для ЗШО и 6 мас. % для породы терриконов) и жидкого стекла (25 мас. % для ЗШО и 20 мас. % для породы терриконов) для формирования оптимальной пористой структуры со средним размером пор  $1,3 \pm 0,2$  мм. Показано, что недостаточное содержание  $\text{NaOH}$  приводит к тому, что большое количество частиц исходного сырья остаются непрореагировавшими и не могут быть связаны в пористую геополимерную структуру, а также разложение пероксида водорода происходит локально. Избыточное количество  $\text{NaOH}$  приводит к слишком интенсивному выделению кислорода и образованию неравномерных пор большого размера. Недостаточное количество жидкого стекла приводит к меньшей геополимеризации, а избыточное – к слиянию пор и оседанию пены, что сопровождается увеличением плотности.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Получены новые данные о физико-химических процессах, происходящих при получении вспененных геополимерных материалов на основе золошлаковых отходов и породы терриконов, а также о влиянии каждого компонента сырьевой смеси на формирование структуры и свойств материала.

Разработаны оптимальные составы для синтеза вспененных геополимерных материалов, которые позволяют эффективно использовать золошлаковые отходы и породы терриконов, что способствует сохранению окружающей среды и позволяет экономить первичные природные ресурсы.

Определены основные физико-механические характеристики полученных вспененных геополимерных материалов:

– на основе ЗШО: кажущаяся плотность –  $278 \text{ кг/м}^3$ , предел прочности при сжатии – 1,06 МПа, общая пористость – 88,06 %, водопоглощение – 10,52 %, коэффициент теплопроводности –  $0,082 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , марка морозостойкости F50;

– на основе породы терриконов: кажущаяся плотность –  $272 \text{ кг/м}^3$ , предел прочности при сжатии – 0,59 МПа, общая пористость – 85,85 %, водопоглощение – 15,36 %, коэффициент теплопроводности –  $0,081 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , марка морозостойкости F50.

Разработаны основные этапы технологии и технологическая схема производства вспененных геополимерных материалов для промышленного внедрения на

предприятиях Донбасса. Экономическая оценка подтвердила высокую конкурентоспособность разрабатываемых материалов.

Результаты выполненных исследований в виде разработанных оптимальных составов и технологии вспененных геополимерных материалов прошли промышленную апробацию на ООО «Тандем-ВП» (г. Новочеркасск), о чем свидетельствует акт о проведении опытно-промышленных испытаний.

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебном процессе кафедры «Общая химия и технология силикатов» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова и используются при подготовке студентов специальности 18.03.01 «Химическая технология», профиль «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» в рамках изучения дисциплины «Химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов».

**Методология и методы исследования.** В качестве методологии диссертационного исследования применялся метод прямого вспенивания, который осуществляется за счет взаимодействия порообразователя с активирующим раствором, а также комплексный системный подход, направленный на всесторонний анализ процессов создания вспененных геополимерных материалов на основе золошлаковых отходов и породы терриконов. Ключевым аспектом исследования выступает выявление и научно обоснованное определение оптимального баланса между процессами геополимеризации и порообразования в структуре геополимерной матрицы.

Свойства исходного сырья и полученных вспененных геополимерных материалов исследованы с помощью рентгеноспектрального флуоресцентного анализа, рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии. Исследование физико-механических характеристик полученных материалов осуществлялось на основе требований соответствующих государственных стандартов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Оптимальный состав и температура отверждения вспененных геополимерных материалов на основе золошлаковых отходов и породы терриконов.
2. Математическая модель влияние состава и температуры на свойства вспененных геополимерных материалов.
3. Механизм образования вспененных геополимерных материалов.
4. Технология получения вспененных геополимерных материалов.

**Степень достоверности полученных результатов.** Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, подтверждены использованием современных физико-химических методов исследования, стандартных методик и высокотехнологичного оборудования на базе Центра коллективного пользования «Нанотехнологии» и лаборатории «Рециклинг отходов топливной энергетики» ЮРГПУ (НПИ).

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты работы были доложены на всероссийских и международных научно-технических конференциях: Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии в науке и образовании» (г. Новочеркасск, 2025), IX Всероссийский молодежный научный форум «Наука будущего – наука молодых» (г. Самара, 2024),

X Всероссийская научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Химия: достижения и перспективы» (г. Ростов-на-Дону, 2024), Международная научно-техническая конференция «Строительство, архитектура и техносферная безопасность» (г. Сочи, 2024), Международная научная школа для молодых ученых, студентов и аспирантов «Zero Waste» (г. Новочеркасск, 2024), Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (г. Сочи, 2024), Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования 2023» (ICMTMTE 2023) (г. Севастополь, 2023), III Всероссийская научная конференция, посвященная девяностолетию кафедры строительного материаловедения «Строительное материаловедение» (г. Москва, 2023), Международная научно-практическая конференция факультета промышленного и гражданского строительства «Строительство и архитектура – 2023» (г. Ростов-на-Дону, 2023), Международная научно-практическая конференция «Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2023 (ICMSSTE 2023)» (г. Ялта, 2023), Международная научная конференция «Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология» (г. Алушта, 2023), XII Международное Курнаковское совещание по физико-химическому анализу (г. Санкт-Петербург, 2022).

**Публикации по теме диссертации.** Результаты диссертации опубликованы в 22 научных работах, в том числе 3 – в российских журналах, входящих в перечни рецензируемых научных изданий и международных реферативных баз данных, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России; 4 – в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science. Получены 3 патента на изобретение РФ.

**Личный вклад.** Личный вклад соискателя заключается в постановке цели и задач исследования, анализе литературных источников, проведении исследований, обработке и интерпретации данных, систематизации результатов, в подготовке публикаций, а также участии в конкурсах и конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 151 странице машинописного текста, включающего 29 таблиц, 35 рисунков, список литературы из 166 источников, 2 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, представлены цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, методология и методы диссертационного исследования, приведены сведения об апробации и внедрении результатов работы.

**В первой главе** представлена проблема накопления золошлаковых отходов и породы терриконов. Рассмотрены существующие теплоизоляционные материалы и выявлены их недостатки. Представлены сырьевые материалы и особенности получения вспененных геополимерных материалов. Установлено, что для щелочной активации отходов угольной энергетики наиболее перспективно использование

гидроксида натрия, силиката натрия (жидкое стекло) и их смеси, а в качестве порообразователя – 30 % раствор пероксида водорода ( $H_2O_2$ ) и порошок алюминия (Al).

**Во второй главе** представлены основные и дополнительные сырьевые материалы для синтеза вспененных геополимерных материалов. Определен химический (таблица 1) и фазовый составы (рисунок 1) основных сырьевых материалов: золошлаковые отходы Новочеркасской ГРЭС (ЗШО Н), золошлаковые отходы Луганской ТЭС (ЗШО Л), порода террикона шахты № 21, г. Краснодон (Порода К), порода террикона шахты имени В.И. Ленина, г. Новошахтинск (Порода Н).

Таблица 1 – Усредненный химический состав сырьевых материалов, мас. %

Отход	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	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	48,2	20,0	14,6	1,5	0,9	3,3	2,6	0,8	0,1	0,1	0,1	7,8
Порода К	39,4	15,8	7,7	0,8	0,4	3,8	0,5	0,9	-	0,1	1,9	28,7
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

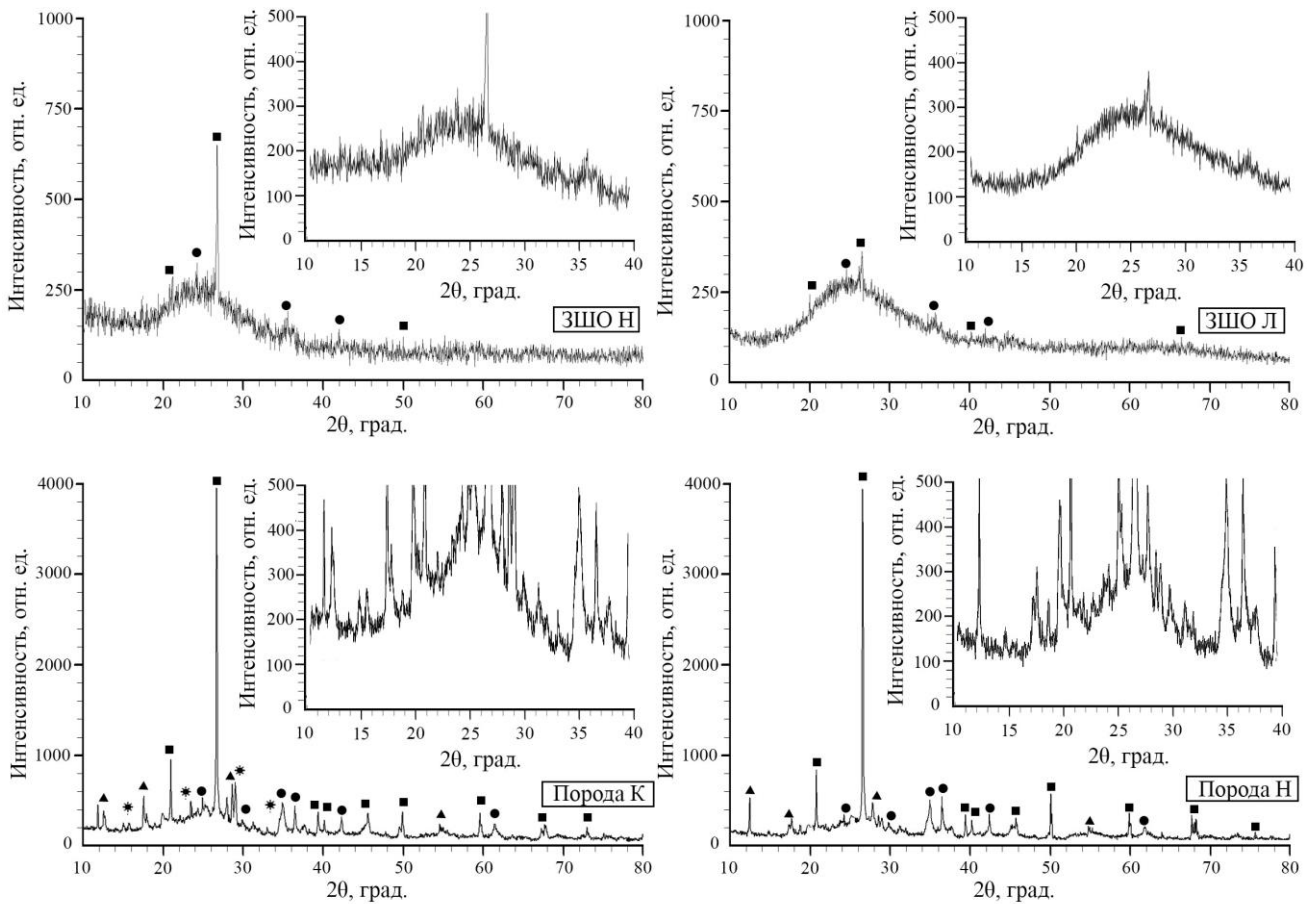


Рисунок 1 – Рентгенограммы отходов угольной энергетики:

■ – кварц ( $\alpha\text{-SiO}_2$ ), ● – гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), ▲ – алюмосиликат натрия ( $\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}$ ),  
\* – альбит ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )

Проведены радиологические испытания отходов и установлено, что все исследуемые отходы относятся к 1 классу строительных материалов и могут быть использованы во всех видах строительства.

Представлена схема получения вспененных геополимерных материалов (рисунок 2).

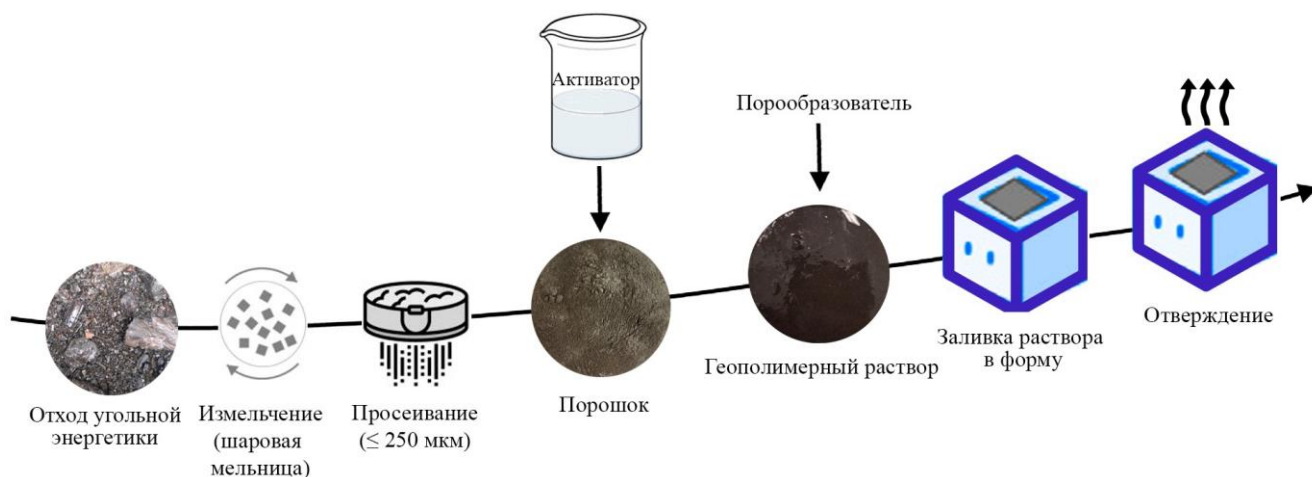


Рисунок 2 – Схема получения вспененных геополимерных материалов

Приведена методология исследований, заключающаяся в комплексном использовании современных методов: рентгенофлуоресцентный и рентгенофазовый анализ, растровая электронная микроскопия, инфракрасная спектроскопия.

В третьей главе представлены исследования по выявлению влияния состава активатора и порообразователя на свойства и структуру вспененных геополимерных материалов, а также выбор оптимальной температуры и времени отверждения.

На начальном этапе исследований синтез вспененных геополимерных материалов осуществлялся с использованием гидроксида натрия и жидкого стекла в качестве отдельных компонентов активатора. В результате экспериментально установлено, что для всех четырех видов исследуемых отходов оптимальное содержание NaOH составляет 8 мас. %, а жидкого стекла – 25 мас. %.

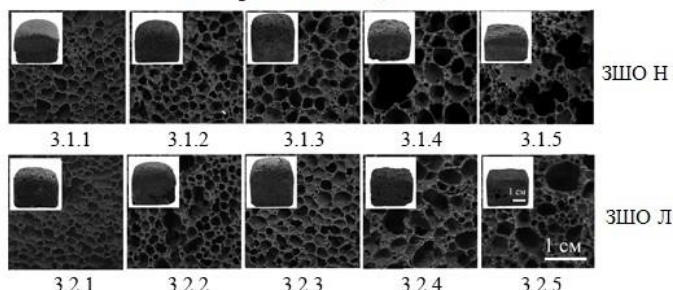
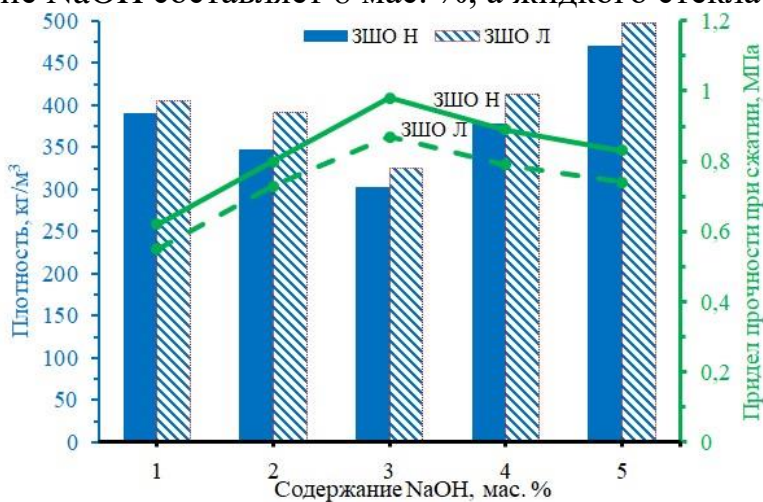


Рисунок 3 – Свойства и структура полученных вспененных геополимерных материалов на основе ЗШО Н и ЗШО Л при исследовании влияния NaOH в смеси с жидким стеклом (25 мас.%)

Однако полученные материалы обладают плотностью более  $400 \text{ кг/м}^3$  при прочности на сжатие не более  $0,4 \text{ МПа}$ . Для повышения данных свойств целесообразно в качестве активатора использовать смесь NaOH и жидкого стекла.

Поэтому на следующем этапе к выбранному ранее оптимальному количеству жидкого стекла (25 мас. %) добавлялось от 1 до 5 мас. % NaOH, и наоборот – к оптимальному NaOH (8 мас. %) добавлялось 10 – 17,5 мас. % жидкого стекла.

Установлено, что в образцах на основе ЗШО увеличение NaOH с 1 до 3 мас. % ускоряет геополимеризацию и

вспенивание, повышая прочность и снижая плотность материалов (рисунок 3). При 4 – 5 мас. % NaOH вспенивание становится слишком интенсивным, поры укрупняются, структура ухудшается. Оптимум для образцов на основе ЗШО составил 3 мас. % NaOH. Для образцов на основе породы оптимально 4 мас. % NaOH.

При варьировании жидкого стекла в сырьевой смеси в материалах на основе ЗШО Н и ЗШО Л повышение содержания жидкого стекла до 12,5 мас. % способствует формированию более совершенной внутренней структуры, что подтверждается снижением плотности с 389 и 407 кг/м<sup>3</sup> до значений 326 и 335 кг/м<sup>3</sup> соответственно (рисунок 4). В образцах на основе породы наилучшими свойствами обладают вспененные геополимерные материалы с содержанием жидкого стекла 15 мас. %.

По итогам дополнительных исследований оптимальными составами признаны: для ЗШО: 3 мас. % NaOH и 25 мас. % жидкого стекла; для породы терриконов: 6 мас. % NaOH и 20 мас. % жидкого стекла.

Для определения влияния порообразующих добавок

на свойства вспененных геополимерных материалов были выбраны 30 % раствор пероксида водорода с содержанием 1 – 3 мас. % и алюминиевый порошок с содержанием 1 – 4 мас. %. По результатам исследований установлено, что оптимальной порообразующей добавкой является пероксид водорода с содержанием 2 мас. %.

Итоговые составы сырьевых смесей на основе исследуемых отходов и свойства синтезированных на их основе вспененных геополимерных материалов показаны в таблице 2. Ключевым фактором, определяющим разницу в свойствах вспененных геополимерных материалов в парах ЗШО Н/ЗШО Л и Порода К/Порода Н является соотношение SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в химическом составе отходов. Более низкое соотношение (2,41 в ЗШО Л против 2,72 в ЗШО Н, а также 2,34 в Породе Н против 2,49 в Породе К) ускоряет реакцию геополимеризации и пероксид водорода не успевает полноценно разложиться и выделить весь газ. Это приводит к образованию материала с более высокой плотностью, и к появлению микротрещин из-за

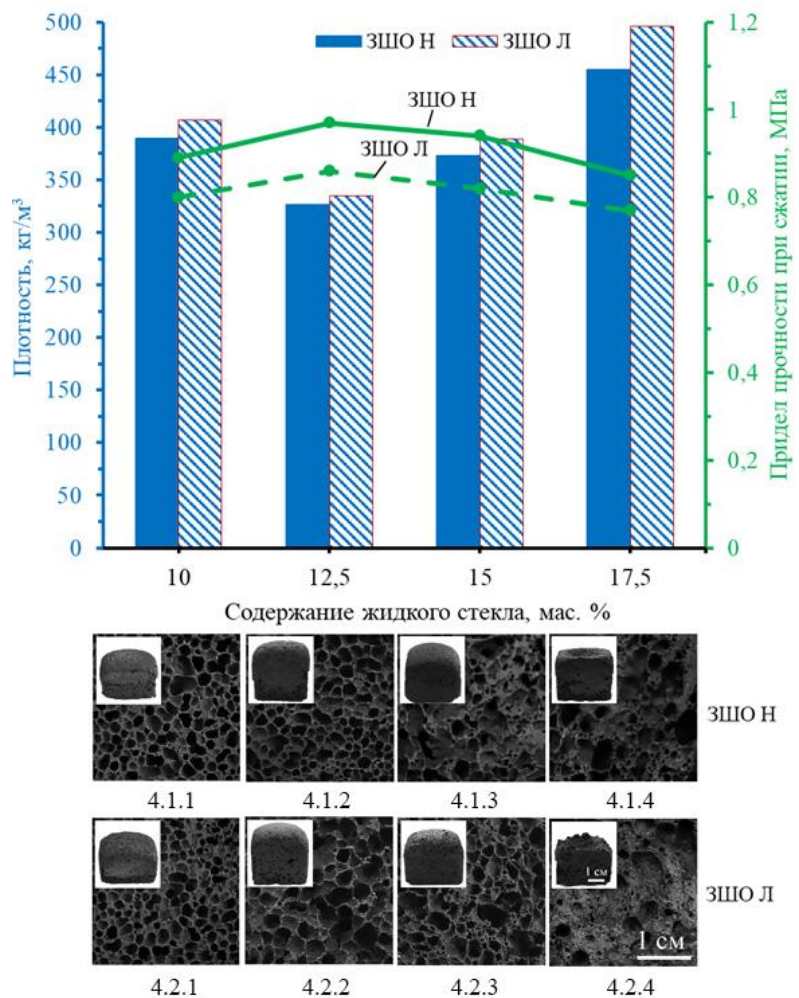


Рисунок 4 – Свойства и структура полученных вспененных геополимерных материалов на основе ЗШО Н и ЗШО Л при исследовании влияния жидкого стекла в смеси с NaOH (8 мас.%)

внутренних напряжений. Для дальнейших исследований выбраны наиболее эффективные материалы (ЗШО Н и Порода К).

Таблица 2 – Итоговые составы сырьевых смесей и свойства полученных вспененных геополимерных материалов

№ опыта	Компонентный состав сырьевой смеси, мас. %								Свойства материала	
	ЗШО Н	ЗШО Л	Порода К	Порода Н	NaOH	Жидкое стекло	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O, сверх 100%	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа
6.1.2	70				3	25	2	9	302	0,98
6.2.2	-	70	-	-	3	25	2	9	325	0,87
6.3.2	-	-	72	-	6	20	2	17	292	0,58
6.4.2	-	-	-	72	6	20	2	17	318	0,52

При сопоставимой плотности материалов на основе ЗШО и породы (302 и 292 кг/м<sup>3</sup>) прочность образцов на основе ЗШО (0,98 МПа) значительно выше, чем у образцов на основе породы (0,58 МПа), что связано с наличием в составе породы химически инертной по отношению к процессу геополимеризации угольной составляющей (около 30 %).

Исследования по замене основного сырья буровыми шламами (Морозовского и Комсомольского месторождений) показали, что получение материалов с удовлетворительными свойствами возможно только при частичной замене (до 30 мас. %) основного отхода угольной энергетики.

Для установления оптимального режима отверждения вспененных геополимерных материалов отверждение проводилось: при комнатной температуре (КТ), в сушильном шкафу при 60, 70, 80, 90 и 100 °С.

Таблица 3 – Свойства полученных вспененных геополимерных материалов, отвержденных при разных условиях.

Температура отверждения	Вспененный геополимерный материал на основе ЗШО		Вспененный геополимерный материал на основе породы	
	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа
КТ	440	1,34	410	0,81
60 °С	306	0,96	289	0,52
70 °С	294	1,02	290	0,60
80 °С	302	0,98	292	0,58
90 °С	320	0,92	313	0,54
100 °С	336	0,87	328	0,51

Наилучшими свойствами обладают образцы, отвержденные при 70 °С (таблица 3). Плотность вспененного геополимерного материала на основе ЗШО составляет 294 кг/м<sup>3</sup> при прочности на сжатие 1,02 МПа, а плотность вспененного геополимерного материала на основе породы составляет 290 кг/м<sup>3</sup> при прочности на сжатие 0,6 МПа.

Оптимальное время отверждения для геополимерных материалов на основе ЗШО и породы составляет 8 и 10 часов соответственно.

**В четвертой главе** методом математического планирования эксперимента произведена оптимизация составов и температуры отверждения вспененных геополимерных материалов:

– на основе ЗШО, мас. %: ЗШО – 71,8; гидроксид натрия – 3; жидкое стекло – 23; 30 % раствор пероксида водорода – 2,2; вода – 9 (сверх 100) и температура отверждения – 70 °С;

– на основе породы, мас. %: порода – 71,6; гидроксид натрия – 6; жидкое стекло – 20; 30 % раствор пероксида водорода – 2,4; вода – 17 (сверх 100) и температура отверждения – 70 °С.

В результате проведения испытаний с учетом требований действующих государственных стандартов были установлены ключевые физико-механические характеристики разработанных материалов (таблица 4).

Таблица 4 – Свойства вспененных геополимерных материалов оптимальных составов.

Свойство	Вспененные геополимерные материалы на основе ЗШО до оптимизации	Вспененные геополимерные материалы на основе ЗШО после оптимизации	Вспененные геополимерные материалы на основе породы до оптимизации	Вспененные геополимерные материалы на основе породы после оптимизации
Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	294	278	290	272
Предел прочности при сжатии, МПа	1,02	1,06	0,60	0,59
Общая пористость, %	87,37	88,06	84,92	85,85
Водопоглощение, %	10,26	10,52	15,09	15,36
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,086	0,082	0,085	0,081

Также образцы на основе ЗШО и породы соответствуют марки морозостойкости F50 и обладают огнестойкостью. Таким образом, независимо от химического состава алюмосиликатного сырья возможно получение вспененных геополимерных материалов со схожими теплоизоляционными свойствами.

Структура оптимизированных вспененных геополимерных материалов на основе ЗШО и породы представлены на рисунке 5.

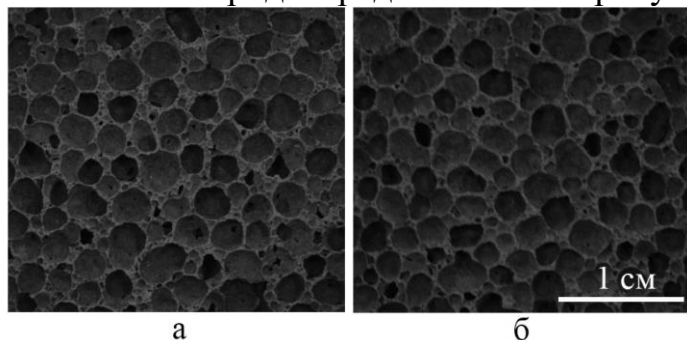


Рисунок 5 – Структура оптимизированных вспененных геополимерных материалов на основе ЗШО (а) и на основе породы (б)

Как видно из рисунка 5, оба материала обладают равномерной пористой структурой с средним размером пор  $1,3 \pm 0,2$  мм.

Успешное протекание процесса геополимеризации доказано с помощью сканирующей электронной микроскопии (рисунок б).

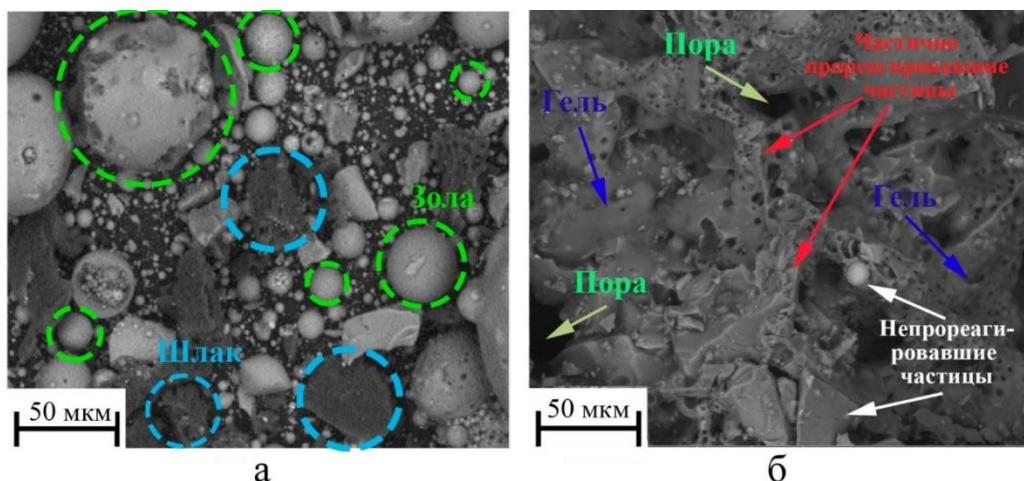


Рисунок 6 – СЭМ-микрофотографии: а – ЗШО, б – вспененный геополимерный материал

Из рисунка 6 видно, что большинство частиц золы и шлака подверглись разрушению под действием активирующего раствора. В результате чего образовался геополимерный гель.

На рисунке 7 показано вспенивание разработанного геополимерного материала. Вспенивание геополимерной массы протекает за 90 с. При этом геополимерный материал увеличивается в ~ 3 раза. После завершения вспенивания еще в течение 50 с происходит возрастание температуры до 65,71 °С. Это вызвано тем, что

растворение алюмосиликатных частиц в щелочном растворе является экзотермическим процессом, ионы  $\text{OH}^-$  разрушают связи Si-O и Al-O с выделением теплоты.

Результаты, полученные в ходе данного исследования, позволяют описать механизм образования вспененных геополимерных материалов (рисунок 8). На первой стадии происходит смешивание частиц ЗШО с жидким стеклом, гидроксидом натрия и водой. На второй стадии под действием щелочи происходит начальное растворение ЗШО. Также на данной стадии в смесь вводятся частицы пероксида водорода. На третьей стадии происходит дальнейшее растворение ЗШО и возникает процесс геополимеризации растворенных частиц.

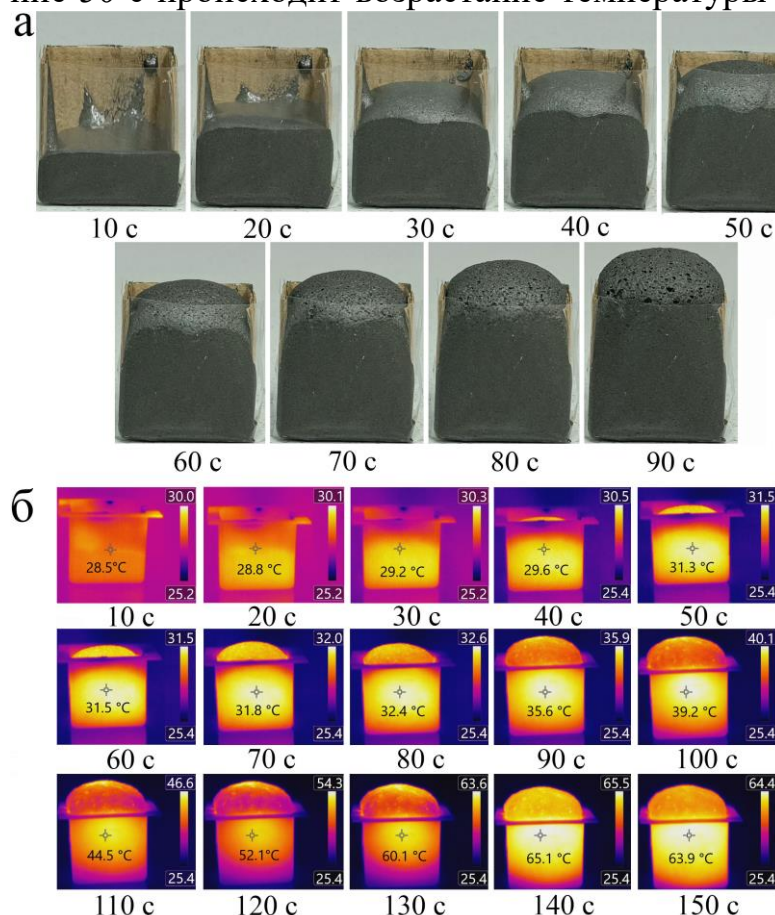


Рисунок 7 – Вспенивание (а) и распределение температур при вспенивании (б) геополимерного материала



Рассчитаны себестоимость и отпускная стоимость разработанных вспененных геополимерных материалов и произведено сравнение стоимости и свойств разработанных материалов с аналогами (таблица 5).

Таблица 5 – Сравнение стоимости и свойств разработанных материалов с аналогами.

Название материала	Средняя стоимость 1 м <sup>3</sup> , тыс. руб.	Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Пеностекло	24,0-34,0	140-210	0,4-1,6	0,045-0,070
Пенобетон	4,3-6,0	400-600	1,5-2,5	0,096 – 0,14
Плиты из минеральной ваты	4,5 – 7,0	50 - 200	0,03 - 0,15	0,041 - 0,07
Пенополистирол экструдированный	5,0-10,0	40 - 150	0,04 - 0,2	0,038 - 0,05
Вспененный геополимерный материал на основе ЗШО	2,6	278	1,06	0,082
Вспененный геополимерный материал на основе породы	3,1	272	0,59	0,081

Из таблицы 5 видно, что разработанные вспененные геополимерные материалы не проигрывают по цене существующим теплоизоляционным материалам. Несмотря на возможное отставание по отдельным техническим параметрам, разработанные вспененные геополимерные материалы представляют собой перспективное решение для задач теплоизоляции благодаря комплексу преимуществ и привлекательной стоимости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны научные основы ресурсосберегающей технологии получения вспененных геополимерных материалов на основе золошлаковых отходов и породы терриконов Донбасса с использованием активирующего раствора «NaOH-жидкое стекло» и порообразователя – раствора H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

### Итоги выполненного исследования:

1. Анализ золошлаковых отходов и пород терриконов показал, что в их составе преобладающими оксидами являются SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а также в материалах присутствует реакционно-активная аморфная фаза, что подтверждает возможность использования данных материалов для синтеза вспененных геополимерных материалов. По результатам радиологических испытаний установлено, что все исследуемые отходы относятся к 1 классу строительных материалов и могут быть использованы во всех видах строительства.

2. На основе золошлаковых отходов и породы терриконов были получены оптимальные составы и температура отверждения:

– на основе ЗШО, мас. %: ЗШО – 71,8; гидроксид натрия – 3; жидкое стекло – 23; 30 % раствор пероксида водорода – 2,2; вода – 9 (сверх 100) и температура отверждения – 70 °С;

– на основе породы терриконов, мас. %: порода терриконов – 71,6; гидроксид натрия – 6; жидкое стекло – 20; 30 % раствор пероксида водорода – 2,4; вода – 17 (сверх 100) и температура отверждения – 70 °С.

3. Показана роль каждого компонента сырьевой смеси. Гидроксид натрия (NaOH) активирует алюмосиликаты, содержащиеся в отходах, а также ускоряет разложение пероксида водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Жидкое стекло (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) увеличивает скорость реакции геополимеризации, повышает щелочность среды и стабилизирует поры. Пероксид водорода используется в качестве порообразователя, причём его разложение должно быть строго синхронизировано с процессом геополимеризации.

4. Показана роль угольной составляющей в составе породы, которая ухудшает прочностные характеристики материала. Уголь не геополимеризуется и включается в структуру лишь в качестве наполнителя, скрепленного жидким стеклом. При этом присутствие угля в породе терриконов не снижает плотность и теплоизоляционные качества конечного материала.

5. Установлены ключевые физико-механические характеристики разработанных материалов:

– на основе ЗШО: кажущаяся плотность – 278 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии – 1,06 МПа, общая пористость – 88,06 %, водопоглощение – 10,52 %, коэффициент теплопроводности – 0,082 Вт/(м·К), марка морозостойкости F50;

– на основе породы: кажущаяся плотность – 272 кг/м<sup>3</sup>, предел прочности при сжатии – 0,59 МПа, общая пористость – 85,85 %, водопоглощение – 15,36 %, коэффициент теплопроводности – 0,081 Вт/(м·К), марка морозостойкости F50.

6. С помощью инфракрасной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии доказано протекания процесса геополимеризации.

7. Разработан механизм получения вспененных геополимерных материалов. Этот механизм дает четкую основу для понимания того, как компоненты активирующего раствора взаимодействуют с отходами и пенообразователем во время образования вспененных геополимерных материалов.

8. На основе полученных экспериментальных результатов разработана технология получения вспененных геополимерных материалов на основе отходов угольной энергетики. Спроектирована технологическая схема производства вспененных геополимерных материалов. Разработанная технология позволит повысить энергоэффективность зданий и сооружений, расширить сырьевую базу строительной отрасли, утилизировать отходы, улучшить экологическую ситуацию.

**Дальнейшие исследования** могут быть направлены на разработку технологии получения вспененных геополимерных материалов с использованием других алюмосиликатных материалов, таких как: сталеплавильные и ферроникелевые шлаки, золы от сжигания биомассы и твердых бытовых отходов, хвосты обогащения руд и тонкомолотые строительные отходы (бой керамики, стеклобой).

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

*В журналах, входящих в перечни рецензируемых научных изданий и международных реферативных баз данных, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:*

1. **Изварин А.И.** Влияние гидроксида натрия на свойства вспененных геополимеров на основе отходов твердотопливной энергетики / **А.И. Изварин** // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2026. – № 1. – С. 85 – 95.

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

3. Яценко Е.А. Влияние температуры отверждения на технологические свойства и структуру геополимеров на основе отходов угольной энергетики / Е.А. Яценко, **А.И. Изварин**, П.О. Орловский, Д.Н. Изварина // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2024. – №. 3. – С. 61 – 66.

*В изданиях, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science:*

4. Yatsenko E.A. Influence of foaming additives on the porous structure and properties of lightweight geopolymers based on ash–slag waste / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, **A.I. Izvarin**, V.M. Kurdashov, A.V. Ryabova // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 443. – P. 137629. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137629. (Scopus, WoS, Q1)

5. Yatsenko E.A. Study on the curing and foaming of surfactant-modified geopolymer gels based on ash and slag waste from coal combustion / E.A. Yatsenko, S.V. Trofimov, B.M. Goltsman, W. Li, V.A. Smoliy, A.V. Ryabova, **A.I. Izvarin** // Gels. – 2023. – Vol. 10. – №. 1. – P. 19. DOI: 10.3390/gels10010019. (Scopus, WoS, Q1)

6. Ryabova A.V. Study of the Composition of the Activating Mixture for the Production of Foamed Geopolymer Materials / A.V. Ryabova, **A.I. Izvarin**, A.A. Timofeeva, L.A. Yatsenko, P.O. Orlovsky // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2024. – Vol. 400 – P. 433 – 442. DOI: 10.1007/978-3-031-47810-9\_39. (Scopus, Q4)

7. 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. – №. 22. – P. 7535. DOI: 10.3390/en16227535. (Scopus, WoS, Q1)

*В сборниках научных трудов, другие публикации:*

8. Игуменцев В.Р. Оптимизации состава геополимерного материала с использованием программы "Statistica" / В.Р. Игуменцев, Е.А. Яценко, **А.И. Изварин** // Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии в науке и образовании» / Южно-Российский государственный политехнический университет – Новочеркасск, 2025, С. 33-36.

9. **Изварин А.И.** Технология утилизации отходов твердотопливной энергетики за счет их использования при получении вспененного геополимерного материала / **А.И. Изварин** // IX Всероссийский молодежный научный форум «Наука

будущего – наука молодых» / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации – Самара, 2024, С. 123.

10. **Изварин А.И.** Синтез пористых геополимерных материалов строительного назначения / **А.И. Изварин**, В.С. Яценко, П.О. Орловский // IX Всероссийская научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Химия: достижения и перспективы» / Южный федеральный университет – Ростов-на-Дону, 2024, С. 263 – 265.

11. Яценко Е.А. Использование отходов твердотопливной энергетики для синтеза вспененных геополимеров / Е.А. Яценко, **А.И. Изварин**, С. Чаудхари, П.О. Орловский, Н.С. Васильев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2024. – Т. 11, № 4. – С. 77 – 81.

12. **Изварин А.И.** Исследование влияния оксида магния на физические свойства геополимерных материалов на основе золошлаковых отходов / **А.И. Изварин**, П.О. Орловский. // Международная научная школа "Zero Waste" для молодых ученых, аспирантов и студентов / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск, 202, С. 74 – 76.

13. Яценко Е.А. Исследование процесса щелочной активации пористых геополимеров строительного назначения / Е.А. Яценко, **А.И. Изварин**, Л.В. Климова, В.С. Романюк, О.А. Старовойтова // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2024. – Т. 11, № 2. – С. 75 – 79.

14. Яценко Е.А. Исследование структуры и свойств вспененных геополимерных материалов на основе отходов твердотопливной энергетики / Е.А. Яценко, **А.И. Изварин**, С. Чаудхари, В.С. Яценко // Вестник современных технологий. – 2023. – Т 4, № 32. – С. 35 – 40.

15. Яценко Е.А. Получение пористых геополимеров для теплоизоляции зданий / Е.А. Яценко, **А.И. Изварин**, В.М. Курдашов, Н.А. Вильбицкая, В.С. Яценко // III Всероссийская научная конференция, посвященная девяностолетию кафедры строительного материаловедения «Строительное материаловедение» / Московский государственный строительный университет – Москва, 2023, С. 334 – 337.

16. **Изварин А.И.** Перспективность применения отходов топливной энергетики Новочеркасской ГРЭС при производстве строительных геополимерных материалов / **А.И. Изварин**, Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.А. Тимофеева // Международная научно-практическая конференция факультета промышленного и гражданского строительства «Строительство и архитектура – 2023» / Донской государственные технический университет – Ростов-на-Дону, 2023, С. 107 – 114.

17. 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 // Международная научно-практическая конференция «Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2023 (ICMSSTE 2023)» / ФГАОУ ВО «Крымский Федеральный университет имени В.И. Вернадского», 2023, С. 14 – 33.

18. **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 // Международная

научная конференция «Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология» / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) – Белгород, 2023, С. 214 – 219.

19. 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 / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого. - Санкт-Петербург, 2022, С. 90 – 92.

***Объекты интеллектуальной собственности:***

20. Патент РФ № 2843864, СПК С04В 38/00 (2025.01). Композиция на основе золы-уноса и шлака для получения теплоизоляционного геополимерного материала / **Изварин А.И.** № 2024135521; заявл. 27.11.2024; опубл. 21.07.2025, Бюл. № 21.

21. Патент РФ № 2828186, МПК С04В 7/28 (2006.01) С04В 38/02 (2006.01) С04В 22/04 (2006.01) С04В 28/26 (2006.01) СПК С04В 18/10 (2024.08); С04В 22/04 (2024.08); С04В 38/02 (2024.08); В09В 3/20 (2024.08); В09В 3/27 (2024.08); В09В2101/30 (2024.08). Вспененный геополимер на основе золошлаковых отходов / Яценко Е.А., Гольцман Б.М., **Изварин А.И.**, Смолий В.А., Климова Л.В., Рябова А.В. № 2024109072; заявл. 04.04.2024; опубл. 07.10.2024, Бюл. № 28.

22. Патент РФ № 2802651, МПК С04В 7/28 (2006.01) С04В 38/10 (2006.01) С04В 28/26 (2006.01) С04В 111/40 (2006.01) СПК С04В 7/28 (2023.05) С04В 7/243 (2023.05) С04В 28/021 (2023.05) С04В 28/26 (2023.05) С04В 38/10 (2023.05) С04В2201/30 (2023.05). Сырьевая смесь на основе золошлаковых отходов для получения геополимерного материала с низкой плотностью / Яценко Е.А., Гольцман Б.М., **Изварин А.И.**, Смолий В.А., Климова Л.В., Трофимов С.В. № 2023108568; заявл. 05.04.2023; опубл. 30.08.2023, Бюл. № 25.

**Изварин Андрей Игоревич**

**РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ВСПЕНЕННЫХ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА  
ОСНОВЕ ОТХОДОВ УГОЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ДОНБАССА**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_.\_\_.2026 г.  
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано в ИД «Политехник»  
346400, г. Новочеркасск, ул. Первомайская, 166  
[mdp-npi@mail.ru](mailto:mdp-npi@mail.ru)