

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

доктора технических наук, профессора Самченко Светланы Васильевны на диссертационную работу Изварина Андрея Игоревича на тему: **«Разработка ресурсосберегающей технологии вспененных геополимерных материалов на основе отходов угольной энергетики Донбасса»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов

На отзыв представлены диссертация, изложенная на 151 странице машинописного текста, включая 35 рисунков, 29 таблицы, список цитируемой литературы из 166 наименований, 2 приложения, а также автореферат диссертации.

### **Актуальность темы диссертации**

Проблема накопления отходов угольной энергетики приобрела в последние десятилетия характер экологического вызова как в масштабах России, так и угледобывающих регионов мира. Объем накопленных золошлаковых отходов в России составляет более 1,8 млрд тонн, а отходов угледобычи в России более 10,7 млрд тонн. На Донбассе, где сосредоточено около 1300 терриконов, а объёмы золошлаковых отходов исчисляются миллионами тонн, вопрос их переработки стоит особенно остро. При действующем уровне утилизации менее 10 % эти отходы продолжают загрязнять почвы, водные объекты и атмосферу, занимая значительные площади. В этой связи использование золошлаковых отходов и породы терриконов в качестве сырья для получения вспененных геополимерных материалов открывает принципиально новый путь: одновременно решаются задачи утилизации техногенных отходов и получения недорогих теплоизоляционных материалов.

Особую значимость работа приобретает для Донбасса, где необходимость восстановления и нового строительства в условиях ограниченных ресурсов делает востребованными именно локальные, дешёвые и технологичные решения. Предлагаемая технология, основанная на использовании NaOH, жидкого стекла и пероксида водорода, не требует дорогостоящего оборудования и может быть адаптирована к реальным отходам конкретных ТЭС и шахт. Таким образом, тема диссертации является актуальной с экологической, экономической и технологической точек зрения, а её реализация соответствует стратегическим задачам ресурсосбережения и устойчивого развития регионов.

### **Научная новизна**

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  $SiO_2/Al_2O_3$  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 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 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 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**

В ходе исследования изучены физико-химические процессы синтеза вспененных геополимерных материалов из золошлаковых отходов (ЗШО) и пород терриконов, а также влияние компонентов смеси на структуру и

свойства получаемых материалов. Подобраны оптимальные составы, позволяющие утилизировать отходы, снизить нагрузку на экологию и сберечь природные ресурсы. Получены образцы с характеристиками: для материалов на основе ЗШО – плотность 278 кг/м<sup>3</sup>, прочность 1,06 МПа, пористость 88,06 %, водопоглощение 10,52 %, коэффициент теплопроводности 0,082 Вт/(м·К), марка морозостойкости F50; для материалов на основе породы терриконов – плотность 272 кг/м<sup>3</sup>, прочность 0,59 МПа, пористость 85,85 %, водопоглощение 15,36 %, коэффициент теплопроводности 0,081 Вт/(м·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 материалов. Результаты выполненных исследований в виде разработанных оптимальных составов и технологии вспененных геополимерных материалов прошли промышленную апробацию на ООО «Тандем ВП», а также внедрены в учебном процессе кафедры «Общая химия и технология силикатов» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

#### **Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность и обоснованность научных результатов, выводов и рекомендаций, представленных в диссертации, обеспечиваются применением современных аналитических методов, воспроизводимостью экспериментальных данных, а также их соответствием теоретическим положениям и данным из опубликованных источников.

Основные положения и результаты работы были доложены на всероссийских и международных научно-технических конференциях. 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.

Результаты работы получены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания на проведение НИР (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).

## Структура представленной работы

**В первой главе** проведён анализ проблемы накопления золошлаковых отходов и пород терриконов, рассмотрены существующие теплоизоляционные материалы (пенополистирол, минеральная вата, пеностекло) и выявлены их недостатки. Также обоснован выбор компонентов для щелочной активации отходов (гидроксид натрия и жидкое стекло) и порообразователя (пероксид водорода и порошок алюминия).

**Во второй главе** представлены результаты определения химического и фазового состава четырёх видов отходов: золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС и Луганской ТЭС, а также породы терриконов городов Краснодон и Новошахтинск. Проведённые радиологические испытания показали, что все отходы относятся к первому классу строительных материалов и могут использоваться без ограничений. Кроме того, приведена принципиальная схема получения вспененных геополимерных материалов и описаны применённые методы исследования.

**В третьей главе** исследовано влияние отдельного и совместного использования гидроксида натрия и жидкого стекла на свойства материалов. Установлено, что совместное использование гидроксида натрия и жидкого стекла даёт синергетический эффект, обеспечивая высокие эксплуатационные свойства вспененных геополимеров. Определены оптимальные составы смесей: для ЗШО – 3 мас. % NaOH и 25 мас. % жидкого стекла; для породы терриконов – 6 мас. % NaOH и 20 мас. % жидкого стекла. Оптимальный порообразователь для всех материалов – 2 мас. % пероксида водорода (30 % раствор). Определены оптимальная температура отверждения – 70 °С, а также время выдержки: 8 часов для ЗШО и 10 часов для породы терриконов. Выявлено, что присутствие угольной составляющей в породе снижает прочность конечного материала, но не ухудшает его теплоизоляционные свойства.

**В четвёртой главе** с помощью математического планирования эксперимента проведена оптимизация составов и режимов отверждения. В результате получены итоговые физико-механические характеристики разработанных материалов. Для материала 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. Для материала на основе породы терриконов: плотность – 272 кг/м<sup>3</sup>, прочность – 0,59 МПа, пористость – 85,85%, водопоглощение – 15,36 %, теплопроводность – 0,081 Вт/(м·К), морозостойкость также F50. Методами инфракрасной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии доказано протекание процесса геополимеризации, а также описан механизм образования вспененных геополимерных материалов.

**В пятой главе** на основе полученных экспериментальных результатов разработана технологическая схема производства вспененных

геополимерных материалов, определены основные технологические узлы. Проведена экономическая оценка, показавшая конкурентоспособность разработанных материалов по сравнению с существующими аналогами. Разработанная технология позволяет повысить энергоэффективность зданий, утилизировать отходы угольной энергетики и улучшить экологическую ситуацию в регионе.

**В заключении** сформулированы общие выводы по результатам проведенных исследований.

**Автореферат** полностью отражает содержание диссертации, а опубликованные автором работы в должной мере раскрывают все ключевые аспекты исследования.

### **Значимость полученных результатов для развития соответствующей отрасли науки**

Расширены научные основы геополимерного синтеза – впервые для такого техногенного сырья как золошлаковые отходы и породы терриконов (Донбасса) установлены закономерности процессов геополимеризации и вспенивания.

С применением математического планирования эксперимента получены оптимизированные составы и режимы отверждения, устанавливающие количественную связь между технологическими параметрами и конечными свойствами материала.

Разработан механизм получения вспененных геополимерных материалов, описывающий взаимодействие компонентов активирующего раствора с отходами и порообразователем. Данный механизм углубляет существующие представления о физико-химических процессах, протекающих при формировании пористой геополимерной матрицы, и создает научную основу для направленного синтеза материалов с заданными эксплуатационными свойствами.

Обоснована возможность замены природного алюмосиликатного сырья на техногенные отходы угольной энергетики (золошлаковые отходы и породу терриконов) при производстве теплоизоляционных материалов, что развивает научные основы рециклинга крупнотоннажных отходов в технологии силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы**

Результаты диссертационной работы Изварина А.И. рекомендуется к внедрению на предприятиях по производству строительных материалов, в особенности, газо- и пенобетонных изделий, а также на промышленных предприятиях Донбасса и других угледобывающих регионов. Полученные теплоизоляционные материалы (плотность 272–278 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность 0,081–0,082 Вт/(м·К), морозостойкость F50, огнестойкость) пригодны для

использования в строительстве (утепление зданий, сооружений, оборудования) как экологичные и экономически конкурентоспособные аналоги пенобетона, минваты и пеностекла. Результаты также рекомендуется применять в учебном процессе вузов.

### **Замечания и рекомендации**

1. В работе не представлена методика измерения среднего размер пор.
2. В разделе 2.1.3 указано, что отходы измельчались в шаровой мельнице в течение 4 ч и просеивались через сито 250 мкм. Не приведены данные о том, почему выбрано именно 4 часа (а не 2 или 6). Это важно, так как переизмельчение увеличивает энергозатраты, а недоизмельчение снижает реакционную способность.
3. На странице 94 (таблица 4.10) приводятся данные, свидетельствующие о некотором ухудшении водопоглощения после оптимизации: для материалов на основе золошлакового отхода – на 0,26 %, для материалов на основе породы – на 0,27 %. Вместе с тем в выводах на странице 105 автор констатирует общее улучшение физико-механических характеристик, не акцентируя внимания на данном факте.
4. Нет оценки возврата отходов. Можно ли перерабатывать бракованные образцы обратно в смесь?

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки выполненного исследования.

### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным положением о присуждении ученых степеней**

Диссертация Изварина Андрея Игоревича на тему: «Разработка ресурсосберегающей технологии вспененных геополимерных материалов на основе отходов угольной энергетики Донбасса» является завершенной научно-квалификационной работой, отличающаяся актуальностью и внутренним единством, в которой на основании проведенных автором исследований изложены научно обоснованные технические, технологические решения и разработки, внедрение которых вносит существенное значение для развития строительной отрасли России, что позволит повысить энергоэффективность зданий, утилизировать отходы угольной энергетики и улучшить экологическую ситуацию.

Диссертационное исследование выполнено на высоком научно-техническом уровне с использованием современных методик. Сформулированные автором научные положения, выводы и рекомендации теоретически обоснованы и подтверждены экспериментально. Представленные в работе результаты, принадлежащие Андрею Игоревичу Изварину, отличаются оригинальностью, достоверностью, научной новизной и практической значимостью.

Диссертация Изварина Андрея Игоревича является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические, технологические решения и разработки по получению вспененных геополимерных материалов на основе отходов угольной энергетики. Работа соответствует критериям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (в действующей редакции), предъявляемых к кандидатским диссертациям, а её автор, **Изварин Андрей Игоревич**, заслуживает присуждения ученой степени **кандидата технических наук** по специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

Даю свое согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

**Официальный оппонент:**

Доктор технических наук (05.17.11 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов), профессор, заведующий кафедрой строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Самченко  
Светлана Васильевна

«19» мая 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

Адрес: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Телефон: +7 (499) 183-32-29

E-mail: [SamchenkoSV@mgsu.ru](mailto:SamchenkoSV@mgsu.ru) Сайт: <https://mgsu.ru/>

Подпись Самченко Светланы Васильевны ЗАВЕРЯЮ

НАЧАЛЬНИК УПРАВЛЕНИЯ  
ПО РАБОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ

Т. И. ЧЕРЕПОВА

