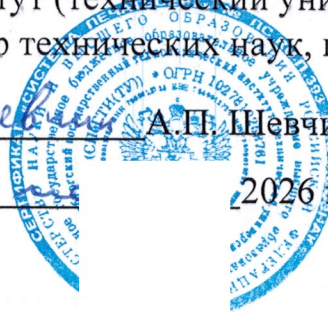


УТВЕРЖДАЮ

Ректор федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский
государственный технологический
институт (технический университет)»,
доктор технических наук, профессор


А.П. Шевчик
«25» _____ 2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» 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

1. Актуальность темы исследования

Представленное исследование посвящено проблеме утилизации отходов угольной энергетики. В России накоплено свыше 1,8 млрд тонн золошлаковых отходов (ЗШО) и более 10,7 млрд тонн породы терриконов. Особую остроту проблема приобретает на Донбассе, где ежегодно образуется до 8 млн тонн подобных отходов. Объем утилизации отходов угольной энергетики в России не превышает 10 % и в основном они используются в качестве добавок в цементы и бетоны.

Перспективным направлением утилизации отходов угольной энергетики является их использование для создания вспененных геополимерных теплоизоляционных материалов. Это тем более актуально, что традиционные утеплители имеют серьезные недостатки: органические материалы пожароопасны и токсичны, минераловатные быстро деградируют под воздействием влаги, а пеностекло остается экономически недоступным.

Следовательно, данное исследование позволит решить комплекс задач: утилизировать многомиллионные тонны отходов, снизить экологическую нагрузку, получить доступную и долговечную теплоизоляцию.

2. Структура и содержание работы

Для отзыва представлены автореферат и диссертация, состоящая из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 151 странице машинописного текста, включающего 29 таблиц, 35 рисунков, список литературы из 166 источников, 2 приложения.

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 представлен всесторонний аналитический обзор отечественной и зарубежной научно-технической литературы, посвященной актуальным вопросам накопления золошлаковых отходов и породы терриконов. Проведен анализ существующих теплоизоляционных материалов, на основе которого выявлены их основные недостатки. Детально рассмотрены сырьевые компоненты и технологические особенности получения вспененных геополимерных материалов. По итогам анализа литературных данных сформулированы обоснованные выводы, определяющие направления дальнейших исследований.

Во второй главе описаны материалы и методы исследования. Основными сырьевыми материалами послужили четыре вида техногенных отходов: золошлаковые отходы Новочеркасской ГРЭС, золошлаковые отходы Луганской ТЭС, порода террикона шахты № 21, г. Краснодон, порода террикона шахты имени В.И. Ленина, г. Новошахтинск. Приведена характеристика используемых сырьевых компонентов, включающая данные по их химическому, фазовому и гранулометрическому составам, а также результаты радиологических исследований. Описана методика синтеза вспененных геополимерных материалов, а также представлены используемые физико-химические методы анализа (рентгенофлуоресцентный и рентгенофазовый анализ, растровая электронная микроскопия, инфракрасная спектроскопия и др.).

В третьей главе представлены исследования по выявлению влияния состава активатора и порообразователя на свойства и структуру вспененных геополимерных материалов. На основе каждого из четырех выбранных отходов был получен вспененный геополимерный материал, что позволило провести сравнительный анализ их свойств. В работе также обоснован выбор оптимальной температуры и времени отверждения.

В четвертой главе с применением методов математического планирования эксперимента проведена оптимизация составов и температуры отверждения вспененных геополимерных материалов. В результате экспериментально-расчетных работ определены ключевые физико-механические характеристики разработанных вспененных геополимерных материалов, обеспечивающие их функциональную эффективность. На основе полученных данных предложен и обоснован механизм структурообразования вспененных геополимерных материалов, раскрывающий закономерности формирования их пористой структуры и эксплуатационных свойств.

В пятой главе разработана технологическая схема производства вспененных геополимерных материалов, а также определены и обоснованы основные технологические узлы, обеспечивающие реализацию предлагаемого процесса. Выполнен расчет себестоимости и отпускной стоимости полученных материалов. На завершающем этапе проведен сравнительный анализ стоимости и физико-механических свойств разработанных вспененных геополимерных материалов с существующими рыночными аналогами, что позволило оценить их конкурентоспособность и перспективы практического применения.

В заключении диссертации сформулированы обобщенные выводы по результатам работы.

Автореферат соответствует тексту диссертации, а публикации автора полно и всесторонне отражают содержание рецензируемой работы.

3. Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждается комплексным применением современных физико-химических методов исследования, стандартизированных методик и высокотехнологичного оборудования на базе Центра коллективного пользования «Нанотехнологии» и лаборатории «Рециклинг отходов топливной энергетики» ЮРГПУ (НПИ). С использованием метода математического планирования эксперимента произведена оптимизация составов и температуры отверждения вспененных геополимерных материалов, что позволило обеспечить статистическую обоснованность полученных результатов.

В ходе экспериментальных исследований с учетом требований действующих государственных стандартов установлены ключевые физико-механические характеристики разработанных материалов, такие как: кажущаяся плотность, предел прочности при сжатии, общая пористость, водопоглощение, коэффициент теплопроводности, морозостойкость и огнестойкость. Достоверность полученных данных подтверждена

использованием сертифицированного оборудования, воспроизводимостью результатов и их статистической обработкой.

Результаты выполненных исследований, представленные в виде разработанных оптимальных составов и технологии получения вспененных геополимерных материалов, прошли промышленную апробацию, что свидетельствует о практической значимости работы и обоснованности предложенных научных и технологических решений. Совокупность полученных экспериментальных данных и положительные результаты опытно-промышленных испытаний подтверждают высокую степень достоверности выполненных исследований и обоснованность сформулированных в диссертации выводов и рекомендаций.

4. Научная новизна

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/м³ 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.

5. 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 кг/м^3 , предел прочности при сжатии – $1,06 \text{ МПа}$, 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 кг/м^3 , предел прочности при сжатии – $0,59 \text{ МПа}$, 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».

6. Значимость полученных результатов для развития соответствующей отрасли науки

Установлены химический и фазовый составы, а также радиологические свойства отходов угольной энергетики Донбасса, что расширяет научные представления о сырьевой базе геополимерных материалов техногенного происхождения. Выявлены закономерности влияния вида и соотношения компонентов активирующей смеси, а также порообразующих добавок на структуру и свойства вспененных геополимерных материалов. Эти данные развивают теоретические основы управления процессами пенообразования и структурообразования в геополимерных системах.

Доказана принципиальная возможность эффективной утилизации отходов угольной энергетики Донбасса в технологии вспененных геополимеров. Это направление имеет важное значение для развития ресурсосберегающих и экологически ориентированных научных подходов в строительном материаловедении, а также для решения проблем техногенной безопасности угледобывающих регионов.

Таким образом, работа вносит вклад в углубление теоретических знаний о закономерностях формирования пористой структуры геополимерных материалов на основе техногенного сырья и формирует научные основы для разработки новых энергоэффективных, экологически безопасных строительных материалов, что особенно актуально для угледобывающих регионов, включая Донбасс.

7. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Предложенные в работе научно-технологические основы получения вспененных геополимерных материалов с использованием различных отходов угольной энергетики рекомендованы к использованию на предприятиях угледобывающих регионов страны, что позволит утилизировать многомиллионные тонны отходов и улучшить экологическую ситуацию.

Результаты диссертационного исследования рекомендуются использовать в проведении лекционных, научно-исследовательских и лабораторных работ в профильных образовательных учреждениях.

8. Замечания и рекомендации

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В разделе 1.3.2 перечислены методы вспенивания (прямое, «жертвенный» наполнитель, 3D-печать, СВЧ). Автор выбирает метод прямого вспенивания как «наиболее перспективный в экономическом и технологическом аспектах». Однако следовало бы указать недостатки данного метода.

2. Нет обоснования использования порошков отходов угольной энергетики с размером частиц 250 мкм и менее. Это можно было бы сделать на основе литературных данных (если таковые имеются) или привести свои сравнительные экспериментальные исследования по влиянию размера частиц исходного сырья на свойства конечного материала

3. При реализации матрицы планирования непонятно, какое количество числа степеней свободы были приняты при расчете критерия Фишера.

4. В связи с тем, что работа направлена на утилизацию отходов, возможно, следовало бы рассмотреть вопрос: что будет с самим вспененным геополимером после окончания срока службы в здании? Возможна ли его переработка (например, как заполнителя в бетон) или безопасное захоронение?

5. В диссертационной работе на технологической схеме (рис. 5.1) присутствует «форма для заливки» (поз. 22) и затем «форма со вспененным материалом» (поз. 23). Не сказано: Из какого материала форма (металл, силикон, пластик)? Нужна ли смазка формы? Как извлекается образец после отверждения?

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Изварина Андрея Игоревича.

9. Заключение

Диссертационная работа Изварина Андрея Игоревича на тему: «Разработка ресурсосберегающей технологии вспененных геополимерных материалов на основе отходов угольной энергетики Донбасса» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, 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 и сооружений, расширить сырьевую базу строительной отрасли, утилизировать отходы, улучшить экологическую ситуацию. Работа обладает научной новизной, теоретической и практической значимостью. Текст диссертации написан грамотным техническим языком.

Диссертация Изварина Андрея Игоревича соответствует критериям научного исследования и свободна от признаков плагиата или неправомерного заимствования чужих идей и результатов. По актуальности,

научной новизне и практической значимости, а также числу публикаций в профильных научных изданиях диссертация соответствует требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (в действующей редакции), с учетом соответствия паспорта специальности, а её автор, **Изварин Андрей Игоревич**, заслуживает присуждения ученой степени **кандидата технических наук** по специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

Отзыв ведущей организации рассмотрен и утвержден на заседании кафедры химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов Санкт-Петербургского государственного технологического института (технический университет). Протокол заседания № 5 от 20 мая 2026 г.

Доктор технических наук (специальность 05.17.11 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов), профессор, заведующий кафедрой химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов Санкт-Петербургского государственного технологического института (технический университет)

Пантелеев Игорь Борисович

23.05.2026

Сведения о ведущей организации:

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

Адрес: 190013, г. Санкт-Петербург, проспект Московский, дом 24-26/49, литер. А.

Телефон: +7 812 494-92-03

E-mail: office@spbti.ru

Сайт: https://spbti.ru/

Подпись *Пантелеев Игорь Борисович*
Начальник отдела