

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук

Шатохиной Марины Алексеевны

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

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Изварина А.И. посвящена решению крупной научно-технической и экологической проблемы – утилизации многотоннажных отходов угольной энергетики Донбасса, а именно золошлаковых отходов и пород терриконов, с одновременным получением теплоизоляционных материалов.

Накопленный объём золошлаковых отходов (ЗШО) в России превышает 1,8 млрд тонн, а отходов угледобычи – более 10,7 млрд тонн, при этом уровень их переработки не превышает 10%. Хранение таких отходов наносит значительный ущерб окружающей среде. С другой стороны, существующие теплоизоляционные материалы (пенополистирол, минеральная вата, пеностекло) обладают существенными недостатками: низкая огнестойкость, гигроскопичность, высокая стоимость.

Разработка ресурсосберегающей технологии получения вспененных геополимерных материалов на основе указанных отходов позволяет одновременно решить задачи энергоэффективности и улучшения экологической ситуации. В этом заключается актуальность представленной работы, которая имеет важное значение для развития строительной индустрии и промышленности Донбасса и других угледобывающих регионов.

Научная новизна

1. Впервые для отходов угольной энергетики Донбасса (золошлаковые отходы и породы терриконов) научно обосновано использование

активирующего раствора «NaOH-жидкое стекло» и порообразователя H_2O_2 . Установлены закономерности протекания реакций геополимеризации и вспенивания, обеспечивающие получение материалов с плотностью 272 – 278 кг/м³ и коэффициентом теплопроводности 0,081 – 0,082 Вт/(м·К).

2. Выявлено влияние соотношения SiO_2/Al_2O_3 в сырье на равномерность вспенивания и прочность геополимерной матрицы. Показано, что увеличение данного соотношения с 2,41 до 2,72 для золошлаковых отходов и с 2,34 до 2,49 для породы терриконов позволяет повысить прочность на 12 – 13 % при снижении плотности на 7 – 8 %.

3. Установлено, что прочность геополимерного материала снижается при росте содержания примесей (особенно остаточного углерода) и уменьшении доли аморфной фазы, поскольку угольные частицы адсорбируют компоненты щелочного активатора, а реакционная способность сырья падает. Поэтому для активации породы терриконов требуется вдвое больше щелочи (6 мас. %), чем для золошлаковых отходов.

4. Установлено, что оптимальная пористая структура со средним размером пор $1,3 \pm 0,2$ мм формируется при следующем содержании компонентов: NaOH – 3 мас. % для ЗШО и 6 мас. % для породы терриконов; жидкого стекла – 25 мас. % для ЗШО и 20 мас. % для породы терриконов. При недостаточном содержании NaOH значительная часть частиц исходного сырья остаётся непрореагировавшей и не включается в геополимерную матрицу, а разложение пероксида водорода носит локальный характер. Избыток NaOH вызывает слишком интенсивное выделение кислорода, что приводит к образованию неравномерных крупных пор. Дефицит жидкого стекла снижает степень геополимеризации, тогда как его избыток способствует слиянию пор и оседанию пены, что сопровождается увеличением плотности материала.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость заключается в углублении представлений о физико-химических процессах, протекающих при щелочной активации и вспенивании алюмосиликатных отходов угольной энергетики. Установлена роль каждого компонента сырьевой смеси (NaOH, жидкое стекло, H_2O_2) в формировании пористой структуры и прочностных свойств геополимеров.

Практическая значимость подтверждается следующими результатами:

– Разработаны оптимальные составы вспененных геополимерных материалов на основе золошлаковых отходов и породы терриконов.

– Получены материалы с высокими эксплуатационными характеристиками:

1. На основе ЗШО: плотность 278 кг/м³, прочность 1,06 МПа, теплопроводность 0,082 Вт/(м·К), морозостойкость F50.

2. На основе породы: плотность 272 кг/м³, прочность 0,59 МПа, теплопроводность 0,081 Вт/(м·К), морозостойкость F50.

– Разработана технологическая схема производства, проведены опытно-промышленные испытания на ООО «Тандем ВП» (г. Новочеркасск).

– Результаты внедрены в учебный процесс ЮРГПУ (НПИ).

Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации обеспечена использованием современных физико-химических методов анализа (рентгенофазовый, рентгенофлуоресцентный, ИК-спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия), большим объемом экспериментальных данных, применением методов математического планирования эксперимента и сходимостью результатов лабораторных и опытно-промышленных испытаний. Основные положения работы прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях.

Общая характеристика диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (166 источников) и двух приложений. Объем работы – 151 страница, 29 таблиц и 35 рисунков.

Первая глава посвящена анализу современного состояния проблемы утилизации отходов угольной энергетики. В ней рассматриваются масштабы накопления золошлаковых отходов и пород терриконов в России и Донбассе, которые составляют миллиарды тонн, при этом уровень переработки не превышает 10 %. Автор подробно разбирает экологические и экономические

последствия хранения этих отходов. Далее проводится обзор существующих теплоизоляционных материалов с указанием их недостатков. В качестве перспективной альтернативы предлагаются вспененные геополимерные материалы на основе отходов. В главе детально рассматриваются теоретические основы щелочной активации алюмосиликатного сырья (с использованием гидроксида натрия и жидкого стекла) и различные методы вспенивания (прямое вспенивание, «жертвенный» наполнитель, 3D-печать, СВЧ-вспенивание). На основе анализа литературы автор приходит к выводу, что наиболее эффективен метод прямого вспенивания с использованием 30 % раствора пероксида водорода. В завершении главы формулируются цель и конкретные задачи диссертационного исследования.

Вторая глава содержит характеристику сырьевых материалов и описание методик эксперимента. В качестве основных объектов исследования выбраны золошлаковые отходы Новочеркасской ГРЭС и Луганской ТЭС, а также порода терриконов шахт г. Краснодона и г. Новошахтинска. Подробно представлены результаты химического, фазового и гранулометрического анализов этих отходов, а также их радиологические характеристики, подтверждающие безопасность их использования. В главе приведена детальная методика синтеза вспененных геополимерных материалов, включающая этапы измельчения, дозирования, смешивания, заливки в формы, отверждения и последующей обработки. Кроме того, перечислены все физико-химические методы исследования, использованные в работе: рентгенофлуоресцентный и рентгенофазовый анализ, лазерная дифрактометрия, сканирующая электронная микроскопия, ИК-спектроскопия.

Третья глава посвящена разработке составов и режимов отверждения. На первом этапе исследовалось отдельное влияние гидроксида натрия и жидкого стекла на свойства материалов. Было установлено, что отдельное использование гидроксида натрия и жидкого стекла в качестве активатора не позволяет достичь оптимальных характеристик: плотность получалась выше 450 кг/м³, а прочность не превышала 0,41 МПа. Затем было изучено совместное действие компонентов активирующего раствора, что привело к синергетическому эффекту. В результате экспериментов определены

оптимальные составы: для золошлаковых отходов – 3 мас. % NaOH и 25 мас. % жидкого стекла, для породы терриконов – 6 мас. % NaOH и мас. 20 % жидкого стекла. Исследование порообразователей показало, что наилучшие результаты достигнуты с использованием 30-го раствора пероксида водорода в количестве 2 мас. %. Сравнение образцов на основе разных видов отходов выявило, что более высокое соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ обеспечивает лучшие свойства. Также установлено, что для образцов из породы требуется вдвое больше щелочи из-за присутствия инертного угля. Дополнительно исследована возможность частичной замены основного сырья буровым шламом (до 30 мас. %). Оптимальная температура отверждения составила 70 °С.

Четвертая глава посвящена оптимизации составов с помощью математического планирования эксперимента и детальному исследованию свойств полученных материалов. С использованием полного факторного эксперимента 3-го уровня были построены регрессионные модели, описывающие влияние содержания активатора, порообразователя и температуры на плотность материалов. На основе этих моделей проведена оптимизация, позволившая несколько скорректировать составы. После оптимизации были определены ключевые физико-механические характеристики. Протекание процесса геополимеризации исследовано с помощью ИК-спектроскопии и электронной микроскопии. Разработан механизм формирования вспененных геополимерных материалов, который включает четыре стадии: смешивание, щелочное растворение с одновременным разложением пероксида водорода, геополимеризацию с зарождением пор и отверждение. Вспенивание происходит за 90 секунд и сопровождается экзотермическим нагревом до 65,7 °С.

Пятая глава посвящена разработке технологии производства и оценке экономической эффективности. На основе полученных экспериментальных данных спроектирована технологическая схема производства, включающая узлы сушки, помола, дозирования, приготовления активатора, смешивания, формования, камерной сушки и механической обработки. Выполнены калькуляционные расчеты себестоимости для годовой программы 300 тонн продукции. Себестоимость 1 м³ материала на основе ЗШО составила

1789 рублей, отпускная цена – 2639 рублей. Для материала на основе породы эти показатели составили 2117 рублей и 3122 рубля соответственно. Сравнение с аналогами (пеностекло, пенобетон, минвата, пенополистирол) показало, что разработанные материалы конкурентоспособны по цене и обладают рядом преимуществ, включая утилизацию отходов и энергоэффективность.

Значимость для науки и производства полученных автором диссертации результатов

Значимость полученных автором диссертации результатов для науки заключается в установлении закономерностей синхронизации процессов геополимеризации и вспенивания при использовании активирующего раствора «NaOH – жидкое стекло» и пероксида водорода, выявлении роли соотношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в сырье, которое влияет на равномерность вспенивания и повышение прочности материала, а также в обосновании влияния примесей, в частности остаточного угля в породе терриконов, на реакционную способность сырья и необходимый расход щелочного активатора. Для производства автором разработана ресурсосберегающая технология получения теплоизоляционных материалов с плотностью 272 – 278 кг/м³ и коэффициентом теплопроводности 0,081 – 0,082 Вт/(м·К) на основе отходов угольной энергетики Донбасса, предложена технологическая схема производства, охватывающая полный цикл от подготовки сырья до готовой продукции, доказана экономическая эффективность с себестоимостью 1 м³ материала около 2000 рублей, что конкурентоспособно по сравнению с существующими аналогами, а результаты внедрены на предприятии ООО «Тандем ВП» и в учебный процесс ЮРГПУ (НПИ).

Рекомендации по использованию результатов и выводов

Разработанные технологические решения целесообразно внедрять на золоотвалах и углеобогатительных фабриках Донбасса и других угледобывающих регионов для переработки накопленных золошлаковых отходов и породы терриконов, а также на предприятиях по производству строительных материалов с получением конкурентоспособной теплоизоляционной продукции.

Замечания по диссертационной работе

По диссертации имеются следующие замечания и рекомендации:

1. В тексте диссертации не указан объём партии материалов, произведённых для опытно-промышленных испытаний на ООО «Тандем ВП». Следовало бы конкретизировать количество произведенных материалов.

2. Из текста диссертации неясно как происходит охлаждение после отверждения при 70 °С? Проводились ли исследования на предмет вероятности растрескивания образцов вследствие резкого охлаждения?

3. Целесообразно было бы указать время перемешивания смеси после добавления пероксида водорода, так как неконтролируемое перемешивание способно нарушить процесс вспенивания.

4. Следовало бы указать размер получаемых лабораторных образцов.

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку научной и практической значимости работы.

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

Диссертационная работа Изварина Андрея Игоревича «Разработка ресурсосберегающей технологии вспененных геополимерных материалов на основе отходов угольной энергетики Донбасса» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований предложены новые технические и технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития строительной отрасли и решения экологических проблем угледобывающих регионов.

Работа соответствует паспорту специальности 2.6.14 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов. Основные результаты опубликованы в 22 научных работах, в том числе в 3 изданиях из перечня ВАК, 4 – в базах Scopus и Web of Science, получено 3 патента РФ.

Диссертация соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении учёных 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 ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.14 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов.

Официальный оппонент:

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

Адрес: 308012, Белгородская область, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Телефон: +79205657555

E-mail: slaviki1@yandex.ru

Сайт: <https://www.bstu.ru/>



Шатохина Марина Алексеевна

подпись

«19» мая 2026г.

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



Шатохина Марина Алексеевна

подпись

Подпись к.т.н., Шатохиной Марины Алексеевны заверяю

Первый проректор
БГТУ им. В.Г. Шухова



Евтушенко Е.И.