

## ОТЗЫВ

официального оппонента **Пыкина Алексея Алексеевича** на диссертационную работу **Левицкой Ксении Михайловны** на тему: **«Сульфатно-шлаковые вяжущие с использованием фосфоангидрита и закладочные смеси на их основе»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия

**Актуальность.** В условиях растущего интереса к экологическим аспектам и вопросам устойчивого использования природных ресурсов, современные исследования в области строительного материаловедения все чаще акцентируют внимание на разработке альтернативных вяжущих материалов. Среди них особое место занимают сульфатно-шлаковые вяжущие, которые могут выступать в качестве альтернативы портландцементу, что, в свою очередь, будет способствовать снижению выбросов углекислого газа и других парниковых газов.

Основным компонентом сульфатно-шлаковых вяжущих является доменный гранулированный шлак, доля которого в составе может достигать 75–85 %. В качестве сульфатного активатора используется гипс или ангидрит, в количестве 10–20 %. В качестве щелочного активатора применяется оксид кальция (до 2 %) или портландцемент (до 5 %). Дополнительным преимуществом СШВ является возможность использования в качестве сульфатного компонента фосфоангидритовых вяжущих, полученных обжигом фосфогипса – одного из наиболее крупнотоннажных отходов производства ортофосфорной кислоты и удобрений из фосфатных пород, ежегодные объемы которого исчисляются сотнями миллионов тонн по всему миру.

Решение задач, поставленных в работе Левицкой К.М. позволит существенно повысить эффективность использования фосфогипса в качестве компонента сульфатно-шлаковых вяжущих и изделий на их основе, что обеспечит расширение сырьевой базы ряда регионов, а также позволит решить экологические проблемы, связанные с накоплением и хранением фосфогипсов. В связи с вышеизложенным, работа Левицкой К.М. является весьма актуальной.

Подтверждением актуальности данного направления служит поддержка исследования Левицкой К.М. грантами Министерства науки и высшего образования РФ, публикация результатов исследований в рецензируемых рейтинговых журналах и представление их на конференциях различного уровня.

**Структура и содержание работы.** Работа выполнена на 193 страницах текста, состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка из 170 наименований и 7 приложений, содержит 59 рисунков, 31 таблицу. Диссертация написана технически грамотным языком, содержательна, обладает внутренним единством и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Качество оформления диссертации соответствует нормативным положениям и требованиям, предъявляемым к работам на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Во введении соискателем обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследования, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследований, показана степень достоверности полученных данных, приведены данные по апробации и внедрению результатов работы.

В первой главе для обоснования цели и задач исследований автор провел анализ отечественной и зарубежной литературы, в котором представлены результаты научных исследований, направленных на изучение возможности использования фосфогипсов в качестве альтернативы природному гипсовому камню при производстве широкой номенклатуры вяжущих, в том числе сульфатно-шлаковых. Сделаны выводы об актуальности проведения исследований по направлению разработки составов сульфатно-шлаковых вяжущих с использованием фосфоангидрита, что позволит решить проблему накопления крупнотоннажных техногенных отходов, таких как: шлак, фосфогипс.

Вторая глава диссертации посвящена описанию характеристик применяемых материалов и используемых методов, оборудования для проведения экспериментальных исследований, подробно описана последовательность изготовления образцов.

В третьей главе приведены результаты комплексного исследования фосфогипсов, взятых с двух различных промышленных предприятий, а также фосфоангидритовых вяжущих, полученных из них при температурах обжига 600, 800 и 1000 °С. Показано, что различный генезис исходной фосфатной породы и отличия в технологических режимах производства ортофосфорной кислоты, в ходе которых образуются исследуемые фосфогипсы, предопределяют различия в их качественных характеристиках и, как следствие, в характеристиках фосфоангидритов, полученных из них. Так же показано, что температура обжига по-разному влияет на рН фосфоангидритов и морфологию их частиц.

В четвертой главе представлены результаты по исследованию влияния рецептурно-технологических факторов, таких как: температура получения фосфоангидрита, его содержание и содержание портландцемента в составе сульфатно-шлаковых вяжущих на их рН и водопотребность, а также физико-механические характеристики сульфатно-шлакового камня.

На основании результатов РФА, анализа микроструктуры и морфологии новообразований сульфатно-шлакового камня в возрастах 28 и 90 сут сделаны заключения о влиянии рецептурно-технологических параметров и генезиса исходных фосфогипсов на процессы структурообразования и, как следствие, на свойства вяжущих. Показано, что в случае использования фосфоангидрита с рН более 11 возможно получение бесцементных сульфатно-шлаковых вяжущих.

Исходя из установленных закономерностей и полученных результатов были выбраны рациональные составы сульфатно-шлаковых вяжущих, для которых определены сроки схватывания, нормальная густота и активность.

В пятой главе представлены свойства закладочных смесей в зависимости от видов сульфатно-шлакового вяжущего, заполнителя и условий твердения.

Показано, что разработанные сульфатно-шлаковые вяжущие отличаются значительно меньшими выбросами углекислого газа при производстве по сравнению с портландцементом. Приведена принципиальная технологическая схема получения сульфатно-шлаковых вяжущих с использованием фосфоангидрита и закладочных смесей на их основе, а также данные об экономической целесообразности результатов исследований.

*Заключение* диссертационной работы в полной мере отражают основные результаты исследования, обоснованы направления для дальнейшего развития темы.

***Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.***

Научные положения, выводы и рекомендации сформулированы на основании полученных экспериментальных результатов с использованием обоснованных методов исследования, не противоречат результатам изысканий других авторов и согласуются с основными научными представлениями в области строительного материаловедения, дополняя и развивая общие принципы управления процессами структурообразования сульфатно-шлаковых вяжущих и изделий на их основе.

Результаты работы апробированы в лабораторных и опытно-промышленных условиях. Заключение диссертационной работы в полной мере отражает основные результаты проведенных исследований.

**Научная новизна.** Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение сульфатно-шлаковых вяжущих с использованием фосфоангидрита и закладочных смесей на его основе. Установлено, что наиболее рациональным, с позиции соотношения энергетических затрат и достигаемых физико-механических свойств СШВ, является получение ФАВ обжигом при температуре 800 °С, что обеспечивает уплотнение поверхности частиц ФАВ, необходимое для минимизации водопотребности, без существенного снижения активности и размолоспособности. Снижение температуры получения ФАВ до 600 °С ведёт к повышению водопотребности за счёт более рыхлой и пористой поверхности частиц, а повышение до 1000 °С – ухудшает размолоспособность и гидратационную активность ввиду её избыточного уплотнения. При использовании 2-х частей кварцевого заполнителя разработанные СШВ позволяют получать закладочные смеси с прочностью 15–19 МПа при твердении в условиях повышенной влажности в температурном интервале 20–40 °С.

Предложена феноменологическая модель процессов структурообразования СШВ, ключевыми факторами которых являются рН ФАВ и соотношение компонентов в системе, определяющие преобладающие механизмы активации шлака, а также блокирующие факторы. При максимальном содержании ПЦ (7 % от ДГШ) и минимальном ФАВ (15 % от ДГШ) в системе создаются наиболее благоприятные условия для щелочной и сульфатной активации шлака с высвобождением ионов  $\text{Si}^{4+}$  и  $\text{Al}^{3+}$ , взаимодействующих с избытком  $\text{SO}_4^{2-}$ , что обеспечивает быстрый набор прочности до 7 сут за счёт образования этtringита и CSH, с последующим

замедлением процесса ввиду блокирования поверхности ДГШ новообразованиями. Снижение количества ПЦ (3,5 % от ДГШ) уменьшает его собственный вклад в упрочнение системы, но вне зависимости от pH и количества ФАВ, приводит к превалированию блокировки новообразованиями поверхности ДГШ над активацией, что отрицательно сказывается на прочности СШВ на всем периоде твердения. При отсутствии ПЦ в системе преобладающее значение обретает сульфатная активация ДГШ, что обеспечивает низкую степень блокировки его поверхности и длительный период равномерного набора прочности, итоговые значения которой, в том числе, зависят от pH и количества ФАВ.

Установлено, что при отсутствии портландцемента в составе сульфатно-шлаковых вяжущих, изготовленных с использованием ФАВ с высоким pH (11,9–12,4), активация ДГШ обеспечивается преимущественно за счет сульфатного компонента, что существенно замедляет процессы структурообразования и вплоть до 28 сут предопределяет низкие физико-механические характеристики бесцементных составов по отношению к содержащим ПЦ. Однако более плавное течение процессов структурообразования в итоге способствует формированию плотной, малопроницаемой матрицы, состоящей из капсулированных наноразмерных CSH и этtringита с плотно интегрированными в неё непрореагировавшими зернами ДГШ, что обеспечивает достижение бесцементными СШВ к 90 сут прочности на сжатие более 50 МПа. При этом увеличение в составе доли ФАВ с 25 до 40 % не оказывает значимого отрицательного влияния на прочность бесцементных СШВ и закладочных смесей на их основе.

*Теоретическая и практическая значимость* работы заключается в дополнении теоретических представлений о влиянии генетически обусловленных характеристик фосфоангидритовых вяжущих и рецептурных параметров изготовления на процессы структурообразования и физико-механические характеристики СШВ и закладочных смесей на их основе.

Установлены закономерности влияния рецептурно-технологических факторов, а именно: количество портландцемента, вид ФГ, температура получения ФАВ и его содержание, на pH среды СШВ непосредственно после затворения, водопотребность, среднюю плотность и предел прочности при сжатии в возрасте 2, 7, 28 и 90 сут, которые позволяют рационализировать состав СШВ и закладочных смесей на их основе с учетом минимальных энергетических и материальных затрат при достижении максимальных физико-механических характеристик конечных изделий.

Доказана возможность получения цементных СШВ с активностью 24–27 МПа и бесцементных СШВ с повышенным содержанием ФАВ (до 40 %), с активностью 33,5 МПа.

Разработаны составы закладочных смесей на основе сульфатно-шлаковых вяжущих с пределом прочности при сжатии 5–19 МПа. Предложена принципиальная технологическая схема получения СШВ с использованием в качестве сульфатного компонента фосфоангидрита и закладочных смесей на их основе.

В ходе работы разработан ряд нормативных документов, результаты

используются в учебном процессе при подготовке магистров по направлению «Строительство».

**Достоверность** представленных результатов не вызывает сомнений. Она обеспечена использованием комплекса современных методов исследований, выполненных на аттестованном оборудовании в рамках стандартных и специализированных методик испытаний; промышленными испытаниями и их положительными практическими результатами; соответствием полученных результатов общепринятым фактам и работам других авторов.

Основные положения работы изложены в 11 публикациях, в том числе: 3 статьи в центральных рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ (K1), 2 статьи в международных изданиях, индексируемых в МБД Scopus (Q1)/WoS (Q2) (K1).

Оценивая диссертацию, следует отметить высокий уровень выполнения работы, комплексный подход к проведению исследований и большой объем новых научных результатов. Автореферат и публикации автора в полной мере отражают содержание диссертации, соответствующей специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия.

При ознакомлении с материалами диссертации Левицкой К.М. возникли следующие вопросы и замечания.

1. В третьей главе соискателем приведены результаты исследований фосфоангидритовых вяжущих, однако отсутствуют данные о сроках схватывания и нормальной густоте.

2. В диссертационной работе проводится анализ влияния рецептурно-технологических параметров на рН водной вытяжки сульфатно-шлаковых вяжущих после затворения, целесообразно было бы привести исследования рН порового пространства образцов в возрасте 28 или 90 суток.

3. Доменный гранулированный шлак является основным компонентом сульфатно-шлаковых вяжущих (до 85%), было бы логично привести данные по прочности, которую может достигнуть шлак без активации его сульфатным и/или щелочным компонентами.

4. В качестве производимого продукта соискателем предложены закладочные смеси, в связи с этим было бы интересно исследовать совместимость предложенных сульфатно-шлаковых вяжущих с попутно добываемыми породами или отходами первичного обогащения тех месторождений, где планируется их использование.

5. В тексте диссертации есть незначительное количество опечаток и стилистические неточности.

Высказанные замечания и возникшие вопросы не влияют на общую положительную оценку диссертации Левицкой Ксении Михайловны.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Диссертация *Левицкой Ксении Михайловны* представляет собой самостоятельно выполненную, завершённую научно-квалификационную работу на актуальную тему, содержащую решение научной задачи, имеющей существенное значение для развития строительной отрасли, выводы и рекомендации, представленные в работе, отличающиеся новизной, а также

теоретической и практической значимостью. Диссертация написана грамотным техническим языком, материал изложен в логической последовательности.

В связи с вышеизложенным считаю, что диссертационная работа на тему «Сульфатно-шлаковые вяжущие с использованием фосфоангидрита и закладочные смеси на их основе» соответствует критериям п. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г., № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, **Левицкая Ксения Михайловна**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия.

**Официальный оппонент:**

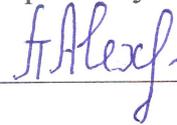
Кандидат технических наук по специальности  
05.23.05 – Строительные материалы и изделия,  
доцент кафедры «Производство строительных  
конструкций»  
ФГБОУ ВО «БГИТУ»



Пыкин  
Алексей Алексеевич

«20» мая 2025 г.

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



А.А. Пыкин

ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет»

Адрес: 241037, г. Брянск, проспект Станке Димитрова, 3

Телефон: +7 (919) 295-74-01 Е-mail: alexem87@yandex.ru

Сайт: <https://bgitu.ru/>

Подпись Пыкина А.А. удостоверяю  
проректор по научной и инновационной  
деятельности ФГБОУ ВО «БГИТУ»





Тихомиров  
Петр Викторович