

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной деятельности
и инновационной деятельности БГТУ
им. В.Г. Шухова,
д.п.н., профессор

Давыденко Т.М.

«20» ноября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова» на диссертационную работу **Смольской Екатерины Алексеевны**, на
тему: **«Разработка экологически эффективных цементов с пониженным клинкер-
фактором на основе природных и техногенных алюмосиликатов»**, представленную
на соискание ученой степени **кандидата технических наук**
по специальности 2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких
неметаллических материалов

1. Актуальность темы исследования

Производство цемента, являясь крайне востребованным в строительстве, сталкивается с серьезной проблемой чрезмерных выбросов углекислого газа, ведь каждая тонна портландцементного клинкера сопровождается выделением около 836 килограммов CO₂. Чтобы справиться с этим, учёные разрабатывают новые виды цементов, содержащие меньше клинкера и специальные добавки, не ухудшающие прочность и долговечность материала.

В диссертационной работе Смольской Е.А. детально рассмотрена важнейшая проблема современного мира – экологические последствия производства цемента. Приводятся доказательства, что решение данной проблемы требует поиска новых технологий, которые позволят снизить нагрузку на экосистемы планеты и приблизить Россию к выполнению международной программы по борьбе с изменением климата.

Соискатель предлагает создание низкоуглеродных композиционных вяжущих, что позволит существенно смягчить воздействие цементной промышленности на окружающую среду. Новый подход предполагает использование не только природных компонентов, таких как термообработанные глины, но и техногенных отходов, что позволит решить двойную задачу: снизить углеродный след и утилизировать отходы производств.

Таким образом, предложенная технология производства цемента – соответствует приоритетам «зеленого» строительства.

2. Структура и содержание работы

При составлении отзыва рассматривались диссертация и автореферат Смольской Екатерины Алексеевны.

Диссертация состоит из введения, 8 глав, выводов, списка литературы, включающего 312 источников литературы. Работа изложена на 193 страницах машинописного текста, включает 22 таблицы, 71 рисунок и 1 приложение.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен детальный анализ основных факторов эмиссии парниковых газов, возникающих в процессе изготовления портландцементного клинкера, и предложены эффективные технологические методы минимизации указанных выбросов. Представлены количественные оценки объемов углекислого газа, выделяемого на каждом этапе цементного производства, и доказано, что одним из наиболее перспективных подходов к снижению уровня CO_2 является уменьшение содержания клинкера в составе цемента путем введения различного типа пуццолановых компонентов. Продемонстрирована важность развития инновационных экологически чистых низкоуглеродных цементов, в которых массовая доля портландцементного клинкера может быть уменьшена до 50 %, что приведет к сокращению объема эмиссий парниковых газов, как минимум, на 20 %. Обосновано преимущество применения пуццолановых добавок природного и техногенного происхождения для выпуска экологически чистого цемента с пониженным углеродным следом.

Вторая глава посвящена подробному изложению характеристик используемых исходных материалов, описанию применявшегося лабораторного оборудования и методологии проведенных исследований.

В третьей главе исследованы четыре основных механизма активации алюмосиликатов: термообработка, механоактивация, термоактивация и пилларирование. Установлено, что для каолиновых глин типа 1:1 наиболее подходящий тип активации классический – термообработка в диапазоне температур от 550 до 700 °C, в результате чего образуются активные оксиды кремния и алюминия. Для монтмориллонитовых глин типа 2:1 и хлоритовых глин типа 2:1:1 необходимо применять иные типы активации, например, механохимическую активацию, химико-термическую активацию или пилларирование. Каждый вид активации по-своему эффективен, важно лишь предварительно установить состав алюмосиликата, его структурный тип и изучить влияние температуры, времени обжига, а также активаторов. Комплекс таких мер позволит создавать высокоактивные пуццолановые добавки из любого алюмосиликатного сырья, включая отходы промышленности.

Четвертая глава посвящена разработке методик получения усовершенствованных составов портландцемента с применением техногенных пуццолановых добавок, таких как термически обработанный осадок сточных вод и рисовой шелухи. Подтверждена высокая эффективность использования указанных отходов в роли пуццолановых компонентов.

Так, термообработанный осадок сточных вод проявляет свойства, аналогичные кальцинированным глинам; при термообработке алюмосиликатная составляющая дегидроксилируется, образуя активные центры, которые резко повышают пуццолановую активность данного вида отхода. Что касается рисовой шелухи, то даже в необработанном состоянии она содержит значительное количество аморфного диоксида кремния, способствующего дополнительному синтезу гидросиликатных соединений при включении в состав цементных смесей.

Доказана эффективность применения отходов промышленности в качестве активных минеральных добавок в цемент, что позволит расширить сырьевую базу, а также снизить негативное воздействие от складирования промышленных отходов.

В пятой главе научно обоснована потенциальная роль пилларированных глин в качестве активных минеральных добавок. Этот механизм активации особенно эффективно проявляется в глинах со смешанной слоистой структурой типов 2:1 и 2:1:1.

Экспериментально было обнаружено, что пилларированные монтмориллонитовые и иллит-хлоритовые глины демонстрируют в 2,5 раза большую интенсивность поглощения света по сравнению с пилларированными каолиновыми глинами. Такой эффект обусловлен процессом интеркалирования (внедрения молекул раствора внутрь слоев глин), характерным преимущественно для глин типов 2:1 и 2:1:1, чем мало подвержены глины семейства 1:1.

Соискатель подчеркивает необходимость учета особенностей типа глин и величины их удельной поверхности для оптимизации механизма пилларирования и максимизации положительных эффектов от внедрения данного метода. Работа, представленная в пятой главе, имеет не только теоретическое значение, расширяя знания о природе и особенностях пуццолановых реакций, но и важное прикладное значение, предлагая практические решения для совершенствования современных технологий цементного производства и обогащения ресурсной базы строительства высококачественными и надежными строительными материалами.

В шестой главе доказано, что предварительная щелочная обработка глин перед термообработкой существенно повышает их пуццоловую активность и позволяет снизить температуру, требуемую для формирования активных центров, на 100 °С. Процесс термощелочной активации включает разрушение полимерных цепочек вследствие дегидроксилирования, в результате чего образуются новые активные центры, ещё не вступившие повторно в химические реакции. Наиболее благоприятно этот механизм реализуется с глинами семейства 2:1 (монтмориллонитовыми) и 2:1:1 (хлоритовыми), а также смешаннослойными. Такие модифицированные добавки обладают повышенной способностью связывать портландит в цементном камне, обеспечивая высокие прочностные характеристики.

В седьмой главе автор справедливо подчеркивает необходимость разработки инновационных технологий синтеза цемента, позволяющих минимизировать экологическое воздействие и обеспечить высокое качество конечного продукта. Для создания низкоуглеродных цементов применяли комплексные добавки, которые состоят из карбонатов и термообработанных алюмосиликатов. Соискателем доказано, что синергетический эффект от использования комплексной добавки наблюдается за счет формирования новых и дополнительных гидратных образований, таких как гидрокарбоалюминаты кальция и стратлингит. Это позволяет даже на поздних сроках твердения протекать пуццолановой реакции, в результате чего уплотняется структура и не происходит образование трещин и пустот даже в условиях агрессивных сред.

Использование запатентованной соискателем технологии демонстрирует значительный потенциал снижения негативного влияния на окружающую среду. Разработанные низкоуглеродные цементы с использованием различной сырьевой базы подтверждают это. Полученные составы можно отнести к цементу типа ЦЕМ II/A-П 52,5Н согласно ГОСТ 31108-2020, что позволяет уже сейчас применять данную технологию на современном производстве.

В результате проведенной работы, разработаны 13 составов композиционных цементов, содержание добавок в которых варьировалось от 25 % до 50 %. При максимальной доле замещения клинкера на комплексную добавку в количестве 50 % удалось существенно повысить плотность и прочность цемента – до 63,5 МПа на сжатие в возрасте 28 сут.

Представленные исследования вносят существенный вклад в развитие методов проектирования современных низкоуглеродных цементов, расширяют ассортимент используемых добавок и способствуют внедрению инноваций в строительной отрасли. Результаты имеют высокую значимость для решения проблем экологии строительства и демонстрируют возможности устойчивого развития индустрии. Работа выполнена профессионально, обоснованно и научно аргументирована.

В восьмой главе представлены результаты опытно-промышленных испытаний разработанных составов композиционных низкоуглеродных цементов. Проведённые испытания показали полное соответствие характеристик полученного материала требованиям действующих стандартов и подтверждают возможность безопасной эксплуатации готовых изделий. Таким образом, представленный материал отражает высокий уровень научной проработанности проблемы и успешность внедрения технологических решений в производственный процесс.

Заключение диссертации систематизирует ключевые научные положения и обобщает полученные результаты. Оно формулирует чёткие выводы относительно перспектив дальнейшего изучения рассматриваемых процессов и разработок. Рекомендации автора отражают современное состояние вопроса и указывают направления дальнейших научных изысканий. Заключение характеризует глубину теоретического анализа, полноту охвата тематики и адекватность выводов, сделанных на основании эмпирических данных. Формулировки носят объективный характер и подчёркивают важность дальнейших исследований в области создания высокоэффективных строительных материалов. Таким образом, заключение свидетельствует о высоком уровне научной компетенции автора и значимости проделанной работы для современного состояния науки и практики.

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

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

Представленные в диссертации результаты были получены с применением стандартных методик контроля качества цементов, соответствующих общепринятым международным и отечественным нормам. Данные методы позволили провести всестороннюю оценку исследуемых объектов и подтвердить заявленную эффективность разработанных низкоуглеродных цементов. Приводимая оценка точности измерения демонстрирует соблюдение строгих требований к качеству проводимых экспериментов и надежность полученных результатов. Важным аспектом является согласованность представленных данных с существующими научными публикациями, что дополнительно укрепляет доверие к выполненным исследованиям. Следовательно, указанные результаты заслуженно формируют основу для обоснованных рекомендаций по улучшению существующих практик производства цементов с пониженным клинкер-фактором и соответствуют уровню современной науки.

4. Научная новизна

Установлено, что для достижения максимальной пуццолановой активности, для каждого семейства (типа) слоистых алюмосиликатов необходимо использовать разные способы обработки: термообработка, механоактивация, термоактивация и пилларирование. Доказано, что для каолинитового типа со структурой 1:1 наиболее подходящий тип

активации классический – термообработка в диапазоне температур от 550 до 700 °С, в результате чего образуются активные оксиды кремния и алюминия. Для монтмориллонитовых (или бентонитовых) глин типа 2:1 и хлоритовых глин типа 2:1:1 необходимо применять иные типы активации – механохимическую активацию (термообработка в присутствии щелочного агента с последующим измельчением), химико-термическую активацию (термообработка в присутствии щелочного агента). А также пилларирование – обработка глины раствором сульфата алюминия с последующей интеркаляцией, в результате которой происходит замещение щелочных и щелочноземельных катионов, содержащихся в глине, на алюминий, что приводит к образованию цепочечных кластеров, расширяющих межслоевое пространство алюмосиликатов.

Разработаны новые составы портландцемента с техногенными пуццолановыми добавками – дополнительными цементирующими материалами: термообработанным осадком сточных вод и отходами рисовой шелухи. Полученные цементы обладают плотной структурой и повышенной прочностью, что доказывает эффективность их применения как пуццолановых добавок.

Установлено, что метод пилларирования позволяет получить алюмосиликаты с высокой пуццолановой активностью на основе термоактивированных монтмориллонитовых глин с использованием сульфата алюминия. Пилларирование повышает их удельную поверхность и активность в несколько раз, по сравнению с показателями промышленного метакеолина.

Предложен новый путь создания активных минеральных добавок на основе механизма полимеризации алюмосиликатов раствором щелочи. В результате термощелочной активации глина дегидроксилируется с образованием активных центров, вследствие чего обладает высокой пуццолановой активностью. Данный метод позволяет снизить температуру обжига глин на 100 °С, что уменьшит энергозатраты при производстве таких добавок.

5. Теоретическая и практическая значимость диссертации

Обоснованы и экспериментально проверены четыре основных механизма активации алюмосиликатов разного структурного типа, для каждого конкретного типа алюмосиликатов подобраны оптимальные режимы обработки: температура, изотермическая выдержка, скорость охлаждения, активаторы процесса.

Установлена эффективность применения в качестве активной минеральной добавки как природных термообработанных алюмосиликатов, так и термоактивированных отходов промышленности, таких как осадок сточных вод и рисовая шелуха, пуццолановая активность которых сопоставима с термообработанным монтмориллонитом.

Доказана эффективность применения метода пилларирования в качестве активатора алюмосиликатов структурного типа 2:1 (монтмориллонитовая группа) и 2:1:1 (хлоритовая группа), который позволяет получить новый тип добавок с высокими показателями пуццолановой активности, сопоставимыми с промышленным метакеолином.

Разработаны 13 составов низкоуглеродных цементов – как с природными алюмосиликатами, так и отходами промышленности (термообработанным осадком сточных вод и золой рисовой шелухи), которые могут быть отнесены к цементу типа ЦЕМ II/A-II 52,5Н, что позволяет в будущем расширить диапазон добавок, применяемых в качестве пуццоланов.

Полученные в рамках проведенных исследований результаты позволили разработать способ производства низкоуглеродного цемента, который был запатентован и может быть использован на цементном производстве. Эффективность применения разработанных составов подтверждена современными методами испытаний, которые соответствуют международным стандартам качества.

6. Значимость полученных результатов для развития соответствующей отрасли науки

Исследование представляет собой важный вклад в развитие технологии производства строительных материалов, особенно цемента, путем оптимизации процессов активации алюмосиликатов различного структурного типа. Основные механизмы активации были обоснованы и экспериментально проверены, что обеспечивает научную надежность выводов. Подбор оптимальных режимов обработки, включая температуру, изотермическую выдержку, скорость охлаждения и использование активаторов, является существенным достижением, поскольку оно открывает путь к созданию высокоэффективных составов низкоуглеродных цементов.

В ходе выполнения диссертационной работы обоснованы и экспериментально проверены четыре основных механизма активации алюмосиликатов разного структурного типа, для каждого конкретного типа алюмосиликатов подобраны оптимальные режимы обработки, такие как температура, изотермическая выдержка, скорость охлаждения, активаторы процесса.

Разработаны составы низкоуглеродных цементов с использованием различной сырьевой базы – как природных алюмосиликатов, так и отходов промышленности (термообработанного осадка сточных вод и золы рисовой шелухи), данные составы могут быть отнесены к цементу типа ЦЕМ II/A-П 52,5Н, что позволяет в будущем расширить диапазон добавок, применяемых в качестве пуццоланы.

Диссертация Смольской Екатерины Алексеевны имеет большое значение для строительной индустрии, поскольку предлагаются решения для повышения энергоэффективности, снижения выбросов углекислого газа и улучшения экологической устойчивости производства строительных материалов. Дальнейшие исследования в этом направлении могут привести к разработке новых поколений экологически чистых и экономически эффективных строительных материалов, что соответствует современным тенденциям устойчивого развития и ресурсосбережения.

7. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Предложенные в работе низкоуглеродные составы цементов с использованием различной сырьевой базы рекомендованы к использованию на современных цементных предприятиях. С помощью данного способа можно не только повысить прочность цементов, но и снизить клинкер-фактор до 0,5, при этом прочность низкоуглеродного цемента на 28 сут твердения составляет 63,5 МПа.

Рекомендуется использовать теоретические положения диссертационной работы при разработке лекционных курсов и ведении практических занятий в профильных образовательных учреждениях. Работа представлена на высоком профессиональном уровне, отражает глубокое знание предмета и содержит оригинальные идеи, полезные для совершенствования образовательной программы.

8. Замечания и рекомендации

1. В Главе 3 не представлены данные по тонкости помола цемента и исследуемых добавок. Насколько важна пробоподготовка глин перед их использованием в качестве добавки к цементу? Возможно ли использовать более крупную фракцию добавки и как это повлияет на свойства цемента?

2. В таблице 4.2, стр. 71 приводится влияние температуры кальцинации осадка сточных вод на нормальную густоту и сроки схватывания цемента. Для всех составов наблюдается рост данных показателей, при этом водопоглощение и пористость уменьшаются. С чем связан такой эффект?

3. Не четко показано, за счет чего будет достигаться снижение выбросов парниковых газов, если при производстве низкоуглеродных цемента также используется термообработка алюмосиликатов?

4. Пятая глава посвящена механизму пилларированию алюмосиликатов. В результате данного процесса в межслоевом пространстве глины образуются так называемые кластеры или «подпорки» (стр. 88, рис. 5.3). Получилось ли каким-то методом установить их размер и количество?

5. В Главе 7 представлены данные по прочности полученных низкоуглеродных цемента (стр. 139, рис. 7.11). При этом не указана погрешность. Учитывалась ли она и чему равна?

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Смольской Екатерины Алексеевны.

9. Заключение

Диссертация Смольской Екатерины Алексеевны на тему «Разработка экологически эффективных цемента с пониженным клинкер-фактором на основе природных и техногенных алюмосиликатов» является завершенной научно-квалификационной работой, отличающаяся актуальностью и внутренним единством, в которой на основании проведенных автором исследований изложены новые научно-обоснованные технические, технологические или иные решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, а именно, решена задача по снижению клинкер-фактора цемента до 0,5, при этом разработанные низкоуглеродные цементные составы обладают высокой прочностью, коррозионной стойкостью и морозостойкостью.

Работа выполнена Смольской Е.А., соответствует критериям научного исследования и свободна от признаков плагиата или неправомерного заимствования чужих идей и достижений. Все опубликованные в диссертации результаты оригинальны, доказывают глубокую компетентность и ответственность исследователя. Исходные идеи, концепции и подходы были детально проверены в ходе серии обширных экспериментальных исследований, подтверждающих обоснованность основных положений и выводов. Диссертация Смольской Е.А. обладает научной новизной и практической значимостью, отличаясь глубиной теоретико-методологической проработки и наличием значимых прикладных приложений.

Диссертационная работа соответствует критериям пп. 9–14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции), с учетом соответствия паспорта специальности, а ее автор, **Смольская Екатерина Алексеевна, заслуживает**

