

На правах рукописи

Игорь Панарин

ПАНАРИН ИГОРЬ ИВАНОВИЧ

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ ЦЕМЕНТЫ, АКТИВИРОВАННЫЕ
ОБОГАЩЕННЫМИ ЗОЛОШЛАКОВЫМИ СМЕСЯМИ,
И ТОРКРЕТ-БЕТОНЫ НА ИХ ОСНОВЕ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь - 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Федюк Роман Сергеевич

Официальные оппоненты: **Казанская Лилия Фаатовна**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», и.о. заведующего кафедрой «Строительные материалы и технологии»
Удодов Сергей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», доцент кафедры производства строительных конструкций и строительной механики

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Защита диссертации состоится 10 июля 2024 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.05.20 Пермского национального исследовательского политехнического университета, по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Куйбышева, 109 ауд. 202 (строительный факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и на сайте <http://www.pstu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Карпушко Марина Олеговна

Актуальность. Строительная отрасль требует применения эффективных материалов, обеспечивающих возрастающие потребности при проектировании, строительстве, эксплуатации и ремонте зданий и сооружений различного назначения. Также при этом необходимо решать проблемы, связанные с экологической безопасностью за счет привлечения для производства строительных материалов различных отходов, в том числе техногенных, к которым относятся золошлаковые смеси. В настоящее время широкое применение получили торкрет-бетоны, позволяющие в кратчайшие сроки обеспечить ремонт и обновление зданий и сооружений. В качестве вяжущего для изготовления торкрет-бетонов традиционно используется цемент, однако, с учетом значительной экологической нагрузки от цементной промышленности, достижение улучшенных эксплуатационных характеристик можно добиться только в случае применения композиционных вяжущих материалов с учетом рационально подобранных водовяжущего отношения и гранулометрии компонентов. Поэтому создание составов и технологии торкрет-бетонов на базе композиционных цементов с улучшенным набором свойств, позволяющим обеспечить быстрое и надежное обновление существующих зданий и сооружений, является актуальной научной задачей.

Диссертационное исследование проведено в рамках работы над темой ФНИ Минстроя РФ и РААСН 3.1.2.8. «Разработка теоретических и технологических основ получения бетонов повышенной долговечности», при финансовой поддержке гранта РФФИ 22-19-20115 «Научно-технические основы производства строительных материалов нового поколения для улучшения среды обитания человека с использованием промышленных отходов».

Степень разработанности темы исследования. К настоящему моменту сформирован значительный объем практико-ориентированных исследований, направленных на совершенствование рецептурно-технологических параметров торкрет-бетонов на основе различных видов портландцемента, полиминеральных добавок и химических модификаторов, которые призваны оптимизировать технологические свойства бетонных смесей, а также физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики затвердевших композитов. При этом остаются открытыми вопросы исследования и совершенствования торкрет-бетонов на композиционных цементах с позиции ресурсо- и энергосбережения за счёт рационального выбора сырья и технологических приемов, что позволит получить дополнительный резерв повышения эксплуатационных характеристик.

Целью работы является разработать научно обоснованное технологическое решение, направленное на создание эффективных композиционных цементов, активированных обогащенными золошлаковыми смесями, и торкрет-бетонов на их основе.

Заявленная цель достигалась решением ряда **задач**:

– разработать энергоэффективную технологию получения композиционного цемента (КЦ) с применением обогащения (включающего флотацию и магнитную сепарацию) золошлаковых смесей ТЭЦ, а также многотоннажных отходов строительного комплекса (бетонного лома);

– обосновать составы, изучить физико-механические и технологические свойства КЦ;

- исследовать химический, минералогический и фазовый состав продуктов гидратации, а также микроструктуры цементного камня на композиционных цементах;

– разработать составы и изучить механические, строительно-технологические и эксплуатационные свойства торкрет-бетонов на КЦ;

- провести опытно-промышленную апробацию технологии получения КЦ и торкрет-бетонов с применением техногенных отходов энергетики и строительства;

- разработать нормативно-техническую документацию на КЦ и торкрет-бетоны, включающую технологические, экономические и санитарно-гигиенические аспекты их производства и применения.

Научная новизна работы. Решена важная научная задача, заключающаяся в разработке составов и технологии получения композиционного цемента и торкрет-бетона на его основе с использованием местного сырья и отходов промышленности (золошлаковых отходов ТЭЦ и бетонного лома).

Предложено научно обоснованное технологическое решение получения торкрет-бетона на композиционном цементе, заключающееся в применении техногенных ресурсов на основе отходов промышленности (золошлаковых смесей) и строительства (бетонного лома от разборки зданий и сооружений), активированных и гомогенизированных в вибрационной мельнице, которое позволяет управлять процессами структурообразования за счет сродства структур и формирования высокопрочных новообразований. Разработанная торкрет-бетонная смесь с низким значением отскока (<8%) обеспечивает уплотнение и упрочнение адгезионной контактной зоны с базовым материалом бетонной стены, приводя к более эффективной передаче нагрузок между слоями и увеличивая общую несущую способность всей конструкции.

Установлено, что введение алюмосиликатной составляющей золошлаковой смеси, полученной ее двухступенчатым обогащением, в состав композиционного цемента, вследствие пуццолановой реакции (на наноуровне - до 50 нм), формирования центров кристаллизации новообразований (на микроуровне - 50-100 нм) и коагуляции мезо- и макропор (на макроуровне - 0,1-1 мкм) способствует управлению структурообразованием цементного камня с формированием его высокопрочной микроструктуры.

Обоснован механизм управления структурообразованием высокоплотного (показатель средней размерности открытых капиллярных пор $\lambda=0,052$, показатель однородности размеров открытых капиллярных пор $\alpha=0,856$) бетонного композита, основанный на комплексном эффекте компонентов композиционного цемента (алюмосиликатной составляющей и бетонного лома, подобранных и подготовленных по авторской технологии) рационального состава и гранулометрии. При усилении несущих железобетонных стен торкрет-бетоном на композиционных цементах адгезия между базовым и ремонтным слоями стены возрастает в 1,5 раза по сравнению с традиционным торкрет-бетоном.

Впервые выявлены закономерности влияния различных факторов (состава и пропорции исходных компонентов, параметров их помола) на повышение комплекса эксплуатационных характеристик ремонтных материалов: марки по водоне-

проницаемости до W16, водопоглощения менее 6 мас. %, марки по морозостойкости выше F₁₃₀₀. Научно обоснованы зависимости между количеством введенных алюмосиликатов из обогащенной золошлаковой смеси (до 35 мас. %), физико-механическими свойствами и характеристиками поровой структуры цементных композитов, в частности снижается показатель средней размерности открытых капиллярных пор в 4 раза и повышается показатель однородности размеров открытых капиллярных пор в 3 раза, что способствует существенному повышению прочностных свойств и эксплуатационных характеристик торкрет-бетонов.

Теоретическая и практическая значимость работы. В развитие теории бетоноведения получены новые данные о технологических способах получения торкрет-бетонных смесей на основе композиционных цементов посредством энерго-сберегающих технологических процессов (усовершенствованы параметры флотации, магнитной сепарации и измельчения).

Разработаны композиционные цементы класса ЦЕМ V 52.5 с использованием обогащённой золошлаковой смеси, замещающей портландцементный клинкер до 65 мас. %.

Предложены составы торкрет-бетонных смесей на основе композиционных цементов с применением ранее не используемых сырьевых ресурсов (алюмосиликатной составляющей обогащенной золошлаковой смеси, полученной по разработанной технологии), обеспечивающих создание высокоплотной упаковки гидратных новообразований, что в свою очередь способствует росту ранней прочности торкрет-бетонов на сжатие до 62%, на растяжение при изгибе – до 49%, коэффициента ударной вязкости – до 80%.

Предложена энергоэффективная технология (50 кВт·ч на 1 м³) получения алюмосиликатной составляющей КЦ путем обогащения золошлаковой смеси, включающего ее флотацию и магнитную сепарацию. При замещении обогащенной золошлаковой смесью портландцементного клинкера более 35 мас. %, она является регулятором структурообразования композиционного цемента, повышая физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики композитов на его основе.

Методология и методы исследований. Проводилось системное изучение структуры и свойств сырьевых материалов и цементных композитов. Для создания ремонтных составов использовались теоретические положения закона сродства структур. Физико-механические свойства сырья и разработанных на его основе материалов определялись с применением стандартных методов исследования: физико-химические методы анализа, лазерная гранулометрия, рентгенофазовый и дифференциально-термический анализ, растровая электронная микроскопия и т.д. Эксплуатационные характеристики изучались, как в лабораторных, так и в натуральных условиях с применением инструментальной базы Дальневосточного федерального университета. Современные программные продукты использовались для изучения влияния разработанных материалов на защитные характеристики объектов.

Положения, выносимые на защиту:

- научно-обоснованное технологическое решение создания эффективных композиционных цементов, активированных обогащенными золошлаковыми смесями, и торкрет-бетонов на их основе;

- энергоэффективная технология получения КЦ с применением обогащения (включающего флотацию и магнитную сепарацию) золошлаковых смесей ТЭЦ, а также многотоннажных отходов строительного комплекса (бетонного лома);
- обоснованные составы, изученные физико-механические и технологические свойства КЦ;
- результаты химического, минералогического и фазового состава продуктов гидратации, а также исследованная микроструктура цементного камня на композиционных цементах;
- разработанные составы и изученные механические, строительно-технологические и эксплуатационные свойства торкрет-бетонов на КЦ;
- результаты опытно-промышленной апробации технологии получения КЦ и торкрет-бетонов с применением техногенных отходов энергетики и строительства;
- нормативно-техническая документация на КЦ и торкрет-бетоны, включающая технологические, экономические и санитарно-гигиенические аспекты их производства и применения.

Степень достоверности результатов. Использование современных методов исследования и высокоточного испытательного оборудования является важным фактором, обеспечивающим высокую достоверность результатов. Проведение экспериментов в соответствии с установленными стандартными методиками позволяет получить надежные данные. Кроме того, применение математических статистических методов для обработки и оптимизации результатов исследований позволяет получить более точные и объективные выводы. Анализ статистических данных позволяет выявить закономерности и тенденции, а также оценить степень достоверности полученных результатов. Положительные результаты опытно-промышленного внедрения разработанных материалов также свидетельствуют об их надежности и технической эффективности. Успешное применение материалов на практике с демонстрацией высоких показателей в реальных условиях подтверждает их высокую достоверность и применимость. В целом, комбинация современных методов исследования, экспериментальных работ, математической статистики и опытно-промышленного внедрения позволяет обеспечить высокую достоверность результатов и повышает уверенность в полученных данных и разработанных материалах.

Апробация результатов работы. Результаты диссертации всесторонне обсуждены на: XXIII Международном симпозиуме (Томск, 2019), Международных академических чтениях (Курск, 2021), V и VII Всероссийской научно-практической конференции «Инженерное дело на ДВ России» (Владивосток, 2021, 2023), Второй Национальной научной конференции (Москва, 2022), V Всероссийской научно-практической конференции с междунар. участием (Воронеж, 2022), XVI Ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых (Вологда, 2023), IV Всеросс. науч.-практ. конф. «Строительство. Архитектура. Дизайн» (Курск, 2023), Междунар. науч.-практ. конф. «Инновации в строительстве» (Брянск, 2023), Всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием) «Химия. Экология. Урбанистика» (Пермь, 2023).

Внедрение результатов исследований. Результаты диссертации нашли отражение при создании технической документации:

- СТО 02033957-060-2023 «Композиционный цемент»;
- технологический регламент на производство торкрет-бетона.

Теоретические и практические положения диссертационного исследования применяются в учебном процессе при обучении студентов по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», а также бакалавров и магистров по направлениям подготовки 08.03.01 и 08.04.01 «Строительство», соответственно, в ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет».

Публикации. Основные результаты представлены в 12 работах, в т.ч. в 3 научных статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 3 статьях из журналов, входящих в базы данных Scopus и Web of Science, получены 3 патента на изобретение.

Личный вклад автора состоит в формулировании идеи исследования и создании для нее теоретической базы; непосредственном участии в разработке и внедрении строительных материалов; планировании и осуществлении комплекса эмпирических исследований с дальнейшей обработкой экспериментальных результатов; публикации результатов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает в себя введение, пять глав, выводы и библиографический список. Диссертация состоит из 162 страниц печатного текста, в том числе содержит 21 таблицу, 69 рисунков, библиографический список из 142 наименований и 4 приложения.

Область исследований соответствует п. 1 и 9 паспорта научной специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** в результате анализа литературных данных и выполненных обследований установлено аварийное состояние ряда железобетонных сооружений. Налицо важность восстановления функциональной пригодности этих объектов, в том числе и для возможности эксплуатации в экстремальных условиях, для чего необходимо проведение комплекса ремонтных мероприятий с применением новых строительных материалов. Для усиления несущих стен действующих городских железобетонных сооружений, перспективным является использование торкрет-бетонов, приводящих эти конструкции в соответствие нормативным требованиям (конструктивным и защитным).

Выявлена необходимость расширения способов обогащения техногенного сырья для получения строительных композитов с различными заданными характеристиками, что важно для обеспечения эффективной эксплуатации железобетонных сооружений в экстремальных условиях. В связи с этим **рабочей гипотезой** стало предположение о том, что использование композиционных цементов (КЦ), содержащих в своем составе алюмосиликатное сырье техногенного происхождения (являющееся регулятором структурообразования на нано-, микро и макроуровнях), для изготовления торкрет-бетонов позволит обеспечить совокупность необходимых свойств несущих стен железобетонного сооружения.

Во **второй главе** выполнены описания экспериментов, в которых в качестве компонентов композиционного цемента применялись портландцементный клин-

кер, гипс и алюмосиликатная составляющая (АСС), полученная по авторской технологии из золошлаковых смесей Приморской ГРЭС путем обогащения флотацией и магнитной сепарацией (таблица 1), а также бетонный лом, взятый из фрагментов ремонтируемых зданий и сооружений. Учитывая, что в настоящее время промышленное обогащение золошлаковых смесей является малоэффективным, показывая уровень удаления нежелательных включений не выше 50% (при том, что в лабораторных условиях достигается 90%), в работе были усовершенствованы технологические параметры флотации и магнитной сепарации. Полученная алюмосиликатная составляющая удовлетворяет требованиям к активным минеральным добавкам для цементов по ГОСТ Р 56196-2014.

Таблица 1 – Химический состав исходного и обогащенного сырья

Сырье	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	п.п.п
ЗШС	45,1	19,6	7,9	12,9	0,5	1,5	0,4	0,9	0,9	10,3
АСС	58,8	25,0	1,3	11,0	0,5	1,5	0,1	0,9	0,9	-

В качестве мелкого заполнителя использовался отсев дробления гранитного щебня (АО «Востокцемент», г. Владивосток) с модулем крупности 2,7. Для снижения водопотребности бетонной смеси при сохранении ее требуемой подвижности использован суперпластификатор «Хидетал ГП9 альфа В» (ООО «СКТ-Стандарт», г. Коломна). Для ускорения схватывания торкрет-бетонов применялась сухая добавка «Реолен МС 451» (ООО «Гидрозо», г. Москва).

Все сырьевые материалы отечественного производства, что является важным в условиях введенных против России санкций и необходимости импортозамещения.

Третья глава посвящена разработке составов композиционных цементов. В качестве добавки для регулирования процессов структурообразования использовалась АСС, полученная путем обогащения золошлаковых смесей с помощью флотации и магнитной сепарации (патент №2806396 от 30.05.2023 г.). Алюмосиликатная составляющая (рисунок 1) является обогащенным и более аморфным сырьем сравнительно с исходной золошлаковой смесью (подтверждается увеличением площади гало и уменьшением ширины соответствующих пиков на рентгенограмме), что будет положительно сказываться на реакционной способности (рисунок 2).

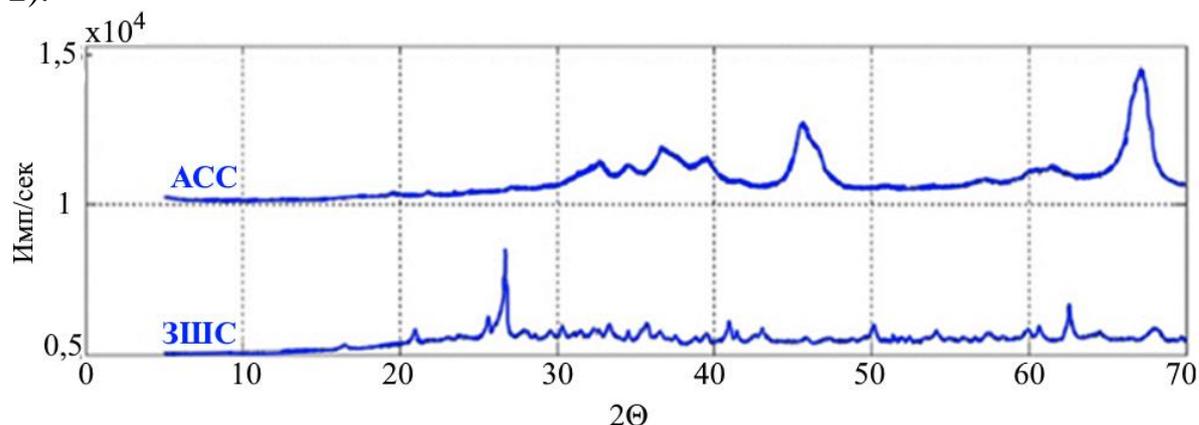


Рисунок 1 – Повышение аморфности алюмосиликатной составляющей



Рисунок 2 – Активность алюмосиликатной составляющей

Разработана широкая номенклатура композиционных цементов, включающих портландцементный клинкер, замещенный до 65 мас. % алюмосиликатной составляющей, совместно измельченных с гипсом в вибрационной мельнице до удельной поверхности ≈ 450 м²/кг (таблица 2).

К рациональному составу КЦ-35 было отдельно добавлено 15 мас. % (от вяжущей основы) бетонного лома. Отмечается незначительное повышение активности, однако основной эффект достигнут при применении фрагментов бетонного лома ремонтируемых конструкций за счет реализации положений закона сродства структур.

Согласно результатам исследования кинетики тепловыделения цементов (рисунок 3), в период 2 часов после затворения вяжущего максимальное тепловыделение отмечается у тонкомолотого бездобавочного цемента (16,8 Дж/г·ч), однако затем компоненты композиционного цемента (АСС и бетонный лом) вступают в реакцию, приводя к максимальному тепловыделению в 12 часов.

Таблица 2 – Составы и активность композиционных цементов при В/Ц=0,5

Маркировка	Состав			Активность, МПа 28 суток	Прирост активности по отношению к контролю, %
	Вяжущая основа, мас. %		Гипс, % от массы клинкера		
	Клинкер	АСС			
Ц1*	100	-	5	45,9	-
Ц2	100	-		55,2	17
КЦ-15**	85	15		56,7	24
КЦ-25	75	25		59,2	29
КЦ-35	65	35		67,7	47
КЦ-35Б	65	35		69,3	51
КЦ-45	55	45		61,2	33
КЦ-55	45	55		56,1	22
КЦ-65	35	65	51,6	12	

* в качестве контроля выступал домолотый совместно с гипсом до ≈ 300 (Ц1) и 450 (Ц2) м²/кг портландцементный клинкер; ** цифра означает процентное содержание алюмосиликатной составляющей

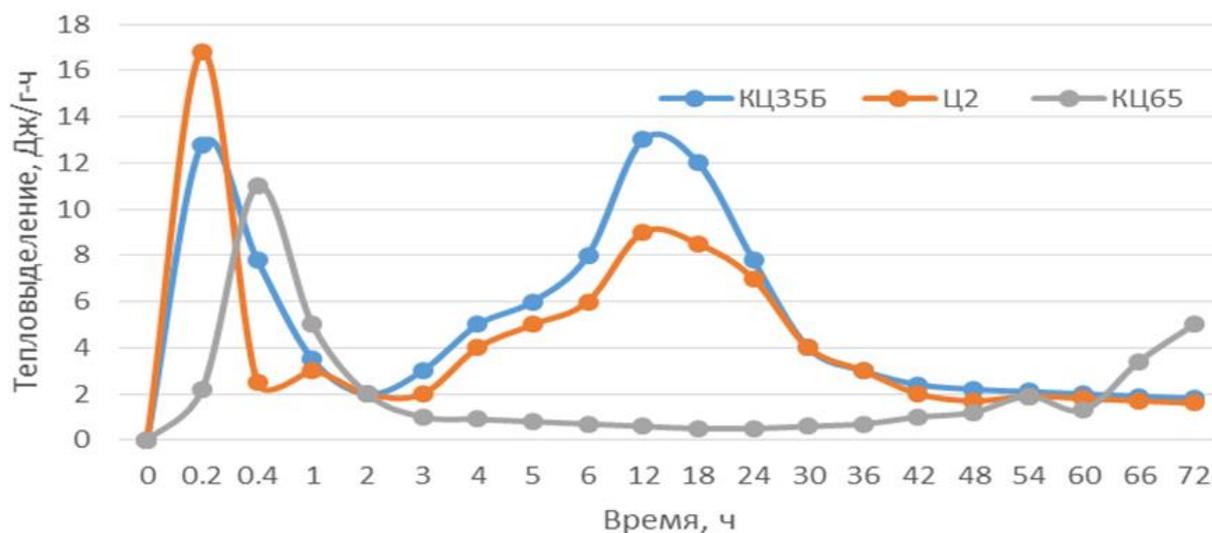


Рисунок 3 – Кинетика тепловыделения вяжущих

Положительное влияние алюмосиликатной составляющей на прочностные свойства подтверждается исследованием микроструктуры цементного камня. В контрольном образце (рисунок 4 *а*) пустоты между частицами клинкера были заняты продуктами гидратации после твердения в течение 28 суток, но наблюдалось множество связанных капиллярных пор. При использовании АСС в количестве 35 мас. % (рисунок 4 *б*) наблюдались более плотные продукты гидратации, чем в контрольном составе. Заметно, что плотность упаковки кристаллогидратов значительно улучшается, блокируя поры. Кроме того, мелкодисперсные частицы алюмосиликатов заполняют мезо- и макропоры цементной матрицы, а также выступают в роли центров кристаллизации новообразований.

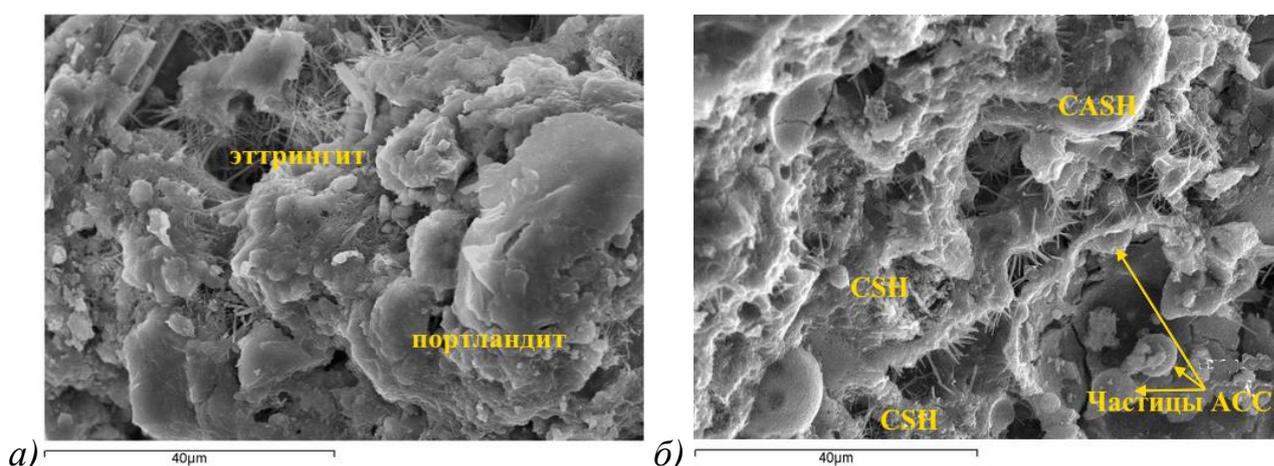


Рисунок 4 - Микроструктура: *а*) контрольный состав, *б*) состав с 35% АСС

Полученные результаты подтверждаются данными ДТА. Эндоэффекты, как в составе с 35% АСС, так и в контрольном образце, имеют схожие картины, отличаясь лишь различиями в гидратных фазах: при 100-140°C (гидросиликатные CSH и трисульфатные алюмоферритные AFt фазы), 180°C (гидроалюминат C_4AH_{19}), 600°C ($Ca(OH)_2$), 750 и 780°C ($CaCO_3$) и 940°C (CSH) (рисунок 5).

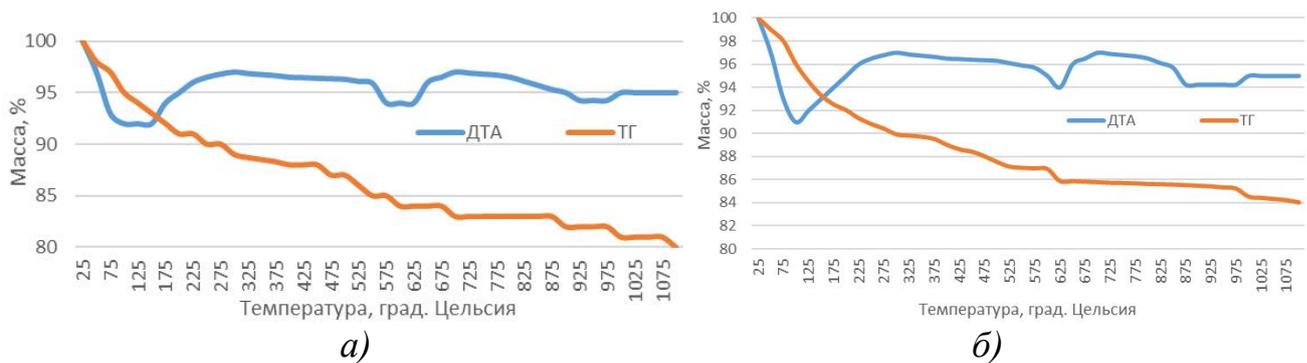


Рисунок 5 - Дифференциально-термический анализ образцов:
а) контрольный состав, *б)* состав с 35% АСС

Снижение площади эндотермического эффекта, характеризующегося удалением физически связанной адсорбционной воды из продуктов гидратации, при 100-140°C для модифицированного цементного камня, показывает снижение содержания гелеобразных новообразований в результате их кристаллизации. Эндотермический эффект при температуре около 600°C соответствует дегидратации $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Рост площади этого пика на термограмме контрольного цементного камня показывает большее содержание портландита в его составе. Также выявлен высокотемпературный гидросиликатный эндоэффект (940°C) в модифицированном образце КЦ-35, более выраженный, чем в немодифицированном образце Ц2.

Установлено повышенное количество отражений РФА для гидросиликатов кальция $\text{CSH}(\text{I})$ и гидроалюминатов кальция C_4AH_x , со сниженным содержанием $\text{CSH}(\text{II})$, портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$, силикатов кальция CS (C_2S и C_3S) и кварца SiO_2 (рисунок 6).

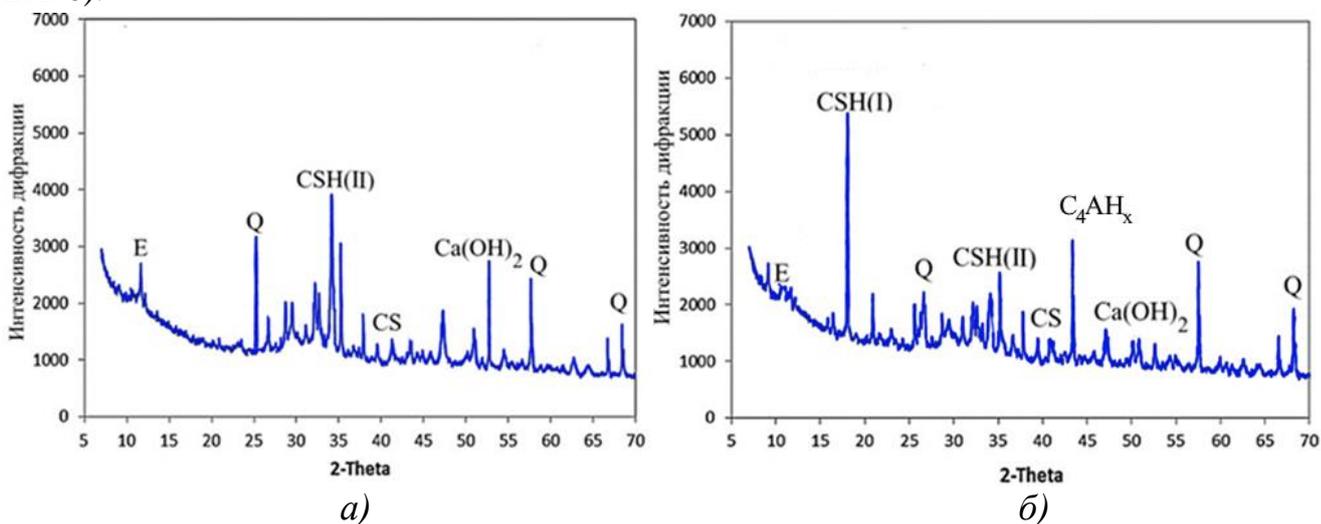


Рисунок 6 - Рентгенофазовый анализ образцов:
а) контрольный состав, *б)* состав с 35% АСС

Четвертая глава посвящена разработке материалов для усиления стен. Разработана широкая номенклатура торкрет-бетонов из композиционных цементов, измельченных до удельной поверхности 450 м²/кг (таблица 3). В качестве мелкого заполнителя применялся отсев дробления гранитного щебня с $M_{кр}=2,7$. Уровень замещения клинкера алюмосиликатной составляющей варьировался от 0 до 35 мас. %.

Водовязущее отношение находилось в пределах 0,3-0,4. Отношение «вязущее: заполнитель» составляло 1 : 3.

Таблица 3 - Составы торкрет-бетонов

№ состава	Расход, кг на 1 м ³								В/В
	Клинкер	АСС	Бет. лом	Гипс	Вода	СП	Реолен	Отсев (M _{кр} =2,7)	
ТБ1(Ц2)	450	-	-	22,5	135	-	2,25	1350	0,3
ТБ2(Ц2)	450	-	-	22,5	157,5	-	2,25	1350	0,35
ТБ3(Ц2)	450	-	-	22,5	180	-	2,25	1350	0,4
ТБ4(КЦ-15)	382,5	67,5	-	19,1	135	1,125	2,25	1350	0,3
ТБ5(КЦ-15)	382,5	67,5	-	19,1	157,5	1,125	2,25	1350	0,35
ТБ6(КЦ-15)	382,5	67,5	-	19,1	180	1,125	2,25	1350	0,4
ТБ7(КЦ-25)	337,5	112,5	-	16,9	135	2,25	2,25	1350	0,3
ТБ8(КЦ-25)	337,5	112,5	-	16,9	157,5	2,25	2,25	1350	0,35
ТБ9(КЦ-25)	337,5	112,5	-	16,9	180	2,25	2,25	1350	0,4
ТБ10(КЦ-35Б)	248,6	133,9	67,5	12,5	135	3,375	2,25	1350	0,3
ТБ11(КЦ-35Б)	248,6	133,9	67,5	12,5	157,5	3,375	2,25	1350	0,35
ТБ12(КЦ-35Б)	248,6	133,9	67,5	12,5	180	3,375	2,25	1350	0,4

Технологические свойства торкрет-бетонов и развитие их плотности приведено в таблице 4. Достижение равной жесткости торкрет-бетонов (20-22 с) осуществлялось благодаря варьированию дозировки суперпластификатора, обладающего высокой водоредуцирующей способностью (40%).

Таблица 4 – Показатели водоотделения торкрет-бетонных смесей

Состав	Водоотделение с течением времени в минутах, %								
	15	30	45	60	75	90	120	230	
ТБ1	0,4	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	6,5	12,5	
ТБ2	0,5	1,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	13,5	
ТБ3	1	2	3,5	4,8	5,9	6,7	7,9	14,0	
ТБ4	0,5	1	1,5	1,8	2,5	3,0	3,5	6,5	
ТБ5	1	1,5	2	2,5	3,0	3,3	3,6	7,5	
ТБ6	1,2	1,5	2,5	3,6	4,5	5	5,5	10,5	
ТБ7	0,5	1,2	1,8	2,2	2,9	3,7	3,9	6,4	
ТБ8	0,8	1,3	2,1	2,7	3,8	4,6	4,8	7,3	
ТБ9	1,5	2,5	3,5	4,5	6,5	6,5	8,5	13,5	
ТБ10	0,5	1	1,5	1,8	2,3	2,8	3,0	6,3	
ТБ11	0,7	1,4	1,7	2,0	2,4	2,9	3,1	7,6	
ТБ12	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	8,5	16,0	

Установлено низкое водоотделение до 16% через 230 минут. Соответственно, данные материалы могут эффективно применяться для торкрет-бетонных работ.

Установлено повышение плотности затворенной смеси с увеличением содержания АСС в КЦ (таблица 5). Это объясняется заполнением мелкодисперсными частицами тонкомолотого КЦ пустот, формирующихся в процессе гидратации. Вве-

дение алюмосиликатной составляющей в малых количествах (до 25 мас. %) незначительно повышает 28-дневную плотность цементного камня (2,0-4,6%). С повышением дозировки АСС (до 35 мас. %) отмечен рост плотности 28-суточных образцов, линейно растущий с увеличением количества введенных алюмосиликатов. Это объясняется уплотнением цементного камня в результате пуццолановой реакции и ускорения кинетики гидратации клинкерных минералов. Повышение объемной доли высокоплотной фазы С-S-H геля будет способствовать снижению объема содержания гелевой субмикropористости.

Таблица 5 – Свойства торкрет-бетонной смеси и развитие плотности

Состав	Жесткость, с	Средняя плотность смеси, кг/м ³	Средняя плотность на 28 суток ($\Delta\rho^{28}$), кг/м ³
ТБ1	20	1960	1878
ТБ2	21	1982	1899(+1,1%)
ТБ3	22	2005	1899(+1,1%)
ТБ4	20	1957	1916(+2,0%)
ТБ5	21	1980	1917(+2,1%)
ТБ6	22	2002	1936(+3,1%)
ТБ7	20	1956	1963(+4,5%)
ТБ8	21	1979	1964(+4,6%)
ТБ9	22	2001	1953(+4,0%)
ТБ10	20	1953	1951(+3,9%)
ТБ11	21	1976	1976(+5,2%)
ТБ12	22	1998	1996(+6,3%)

Эффект повышения прочности на сжатие торкрет-бетонов на КЦ, возрастал при увеличении дозировки АСС до 35 мас. %, и при этом максимальный эффект отмечается для значений ранней прочности, в частности, в возрасте 2 суток приращение прочности на сжатие по сравнению с бездобавочным составом было 62%, а на растяжение при изгибе 49%. Это же подтверждается высокими отношениями значений прочностных свойств во 2 сутки к аналогичным показателям в марочном возрасте: для прочности на сжатие 0,41 (0,33 у бездобавочных клинкерных композитов), для прочности на растяжение при изгибе 0,30 (0,26 у бездобавочных клинкерных составов). Высокая ранняя прочность позволяет применять торкрет-бетон для срочного ремонта железобетонных объектов (таблица 6).

Применение разработанных материалов проводилось при усилении бетонной стены подземного перехода толщиной 20 см слоем торкрет-бетона толщиной 6 см. Для обеспечения надежной совместной работы усиленной стены применены теоретические положения закона сродства структур при проектировании ремонтных торкрет-бетонов. Для этого, в рациональный состав ТБ11 ввели 15% бетонного лома от массы вяжущего. Бетонный лом взят из отслоившихся фрагментов усиливаемых железобетонных блоков с последующим совместным измельчением с компонентами композиционного цемента до удельной поверхности 450 м²/кг. Несущая способность стены увеличилась более, чем в 2 раза: с 15,2 до 33,8 МПа (таблица 7).

Это обеспечивается тем, что прочность ремонтного слоя торкрет-бетона ТБ11 на 28 суток составляет 74,4 МПа, а также уплотнением и упрочнением контактной зоны в результате применения положений закона сродства структур при

проектировании материалов, что привело к увеличению адгезии в 1,5 раза.

Таблица 6 – Механические свойства разработанных торкрет-бетонов

Свойства	ТБ1	ТБ2	ТБ3	ТБ4	ТБ5	ТБ6	ТБ7	ТБ8	ТБ9	ТБ10	ТБ11	ТБ12
Прочность на сжатие, МПа	18,9	23,6	23,8	25,6	28,9	28,2	27,4	29,4	28,9	28,7	30,5	28,1
		(+25%)	(+26%)	(+36%)	(+53%)	(+49%)	(+45%)	(+56%)	(+53%)	(+52%)	(+62%)	(+49%)
		на 7 суток	32,7	34,8	33,6	35,0	37,1	36,2	36,1	38,2	37,3	37,2
		(+6%)	(+3%)	(+7%)	(+13%)	(+11%)	(+10%)	(+17%)	(+14%)	(+14%)	(+20%)	(+17%)
на 28 суток	56,9	59,2	58,1	64,2	72,3	68,8	68,5	73,5	72,3	70,0	74,4	70,4
		(+4%)	(+2%)	(+13%)	(+27%)	(+21%)	(+20%)	(+29%)	(+27%)	(+23%)	(+31%)	(+24%)
$R_{сж}^2 / R_{сж}^{28}$	0,33	0,40	0,41	0,40	0,40	0,41	0,40	0,40	0,40	0,41	0,41	0,40
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	2,1	2,6	2,6	2,7	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,2	3,1
		(+24%)	(+24%)	(+29%)	(+47%)	(+47%)	(+47%)	(+47%)	(+47%)	(+47%)	(+49%)	(+47%)
		на 7 суток	4,3	4,5	4,4	4,9	5,2	5,1	5,1	5,3	5,2	5,2
		(+2%)	(+1%)	(+14%)	(+21%)	(+19%)	(+19%)	(+23%)	(+21%)	(+21%)	(+28%)	(+26%)
на 28 суток	8,0	8,3	8,1	9,6	0,8	10,3	10,3	10,5	10,8	10,5	11,2	10,6
		(+4%)	(+1%)	(+20%)	(+35%)	(+29%)	(+29%)	(+31%)	(+35%)	(+31%)	(+40%)	(+32%)
$R_{из}^2 / R_{из}^{28}$	0,26	0,30	0,27	0,31	0,30	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
$R_{из}/R_{сж}, 2 \text{ сут.}$	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
$R_{из}/R_{сж}, 7 \text{ сут.}$	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
$R_{из}/R_{сж}, 28 \text{ сут.}$	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

Таблица 7 - Результаты усиления стены железобетонного сооружения

Состав торкрет-бетона	Прочность на сжатие до усиления, МПа	Прочность на сжатие после усиления, МПа	Адгезия к бетону, МПа	Толщина стены до усиления, см	Толщина стены после усиления, см
ТБ11 (на КЦ-35)	15,2	33,8	2,9	20	26
ТБ11(на КЦ-35Б)		37,2	4,4		



Рисунок 7 - Характер разрушения образца ТБ11. Коэффициент извилистости на различных участках

$$K_{сuv} = l_f / l_s; 1 - \frac{52 \text{ см}}{34 \text{ см}} = 1,53;$$

$$2 - \frac{58 \text{ см}}{35 \text{ см}} = 1,66;$$

$$3 - \frac{57 \text{ см}}{34 \text{ см}} = 1,68$$

Изучение ударной выносливости разработанных материалов подтвердило, что с ростом содержания алюмосиликатной составляющей увеличивается количество трещин перед разрушением образца и ширина их раскрытия. Коэффициент извилистости трещин, являющийся отношением траектории трещины l_f к расстоянию l_s соединяющему ее начальную и конечную точки, достигал высоких значений от 1,53 до 1,68, как это показано на рисунке 7.

Применение композиционного цемента позволило добиться выдерживания в несколько раз большего числа ударов до отказа исследуемого образца: для состава ТБ11 составляло 171, что на 584% выше аналогичной характеристики для контрольного образца (таблица 8).

Таблица 8 - Характеристики ударной прочности торкрет-бетонов

Состав	Количество ударов до образования первой трещины N_{ff}	Ударная энергия до образования первой трещины, Дж	Количество ударов до разрушения образца N_{cd}	Ударная энергия до разрушения образца, Дж	Коэффициент ударной вязкости $\mu = N_{cd} / N_{ff}$
ТБ1	5	295	25	1475	5
ТБ2	5	295	30	1770	6 (+20%)
ТБ3	4	236	20	1180	5
ТБ4	8 (+60%)*	472	48 (+92%)	2832	6 (+20%)
ТБ5	9 (+80%)	531	63 (+152%)	3717	7 (+40%)
ТБ6	7 (+40%)	413	42 (+68%)	2478	6 (+20%)
ТБ7	12 (+140%)	708	84 (+236%)	4956	7 (+40%)
ТБ8	13 (+160%)	767	104 (+316%)	6136	8 (+60%)
ТБ9	12 (+140%)	708	84 (+236%)	4956	7 (+40%)
ТБ10	18 (+260%)	1062	144 (+468%)	8496	8 (+60%)
ТБ11	19 (+280%)	1121	171 (+584%)	10089	9 (+80%)
ТБ12	18 (+260%)	1062	144 (+468%)	8496	8 (+60%)

* - в скобках процентный прирост по сравнению с контрольным составом ТБ1

Характеристики водонепроницаемости разработанного торкрет-бетона (с 35 мас. % алюмосиликатной составляющей), определённые по ГОСТ 12730.5 (отсутствие фильтрования воды на противоположной грани кубического образца с ребром 10 см на протяжении 12 часов при давлении 1 МПа), показывали эффективную работу под давлением 1,6 МПа (марка W16) (таблица 9).

Изучая кинетику водопоглощения материалов, установлено, что при модифицировании разработанного торкрет-бетона, с повышением содержанием АСС, снижается размерность и объем капиллярной пористости материала, что подтверждается ростом марки по водонепроницаемости с W6 до W16, а также марки по морозостойкости с F₁200 до F₁300.

Объем и размерность открытых капиллярных пор снижались с ростом содержания алюмосиликатной составляющей до 35 мас. %, закономерно уменьшая значения фильтрации. Это объясняется ускорением кинетики гидратации клинкерных минералов и ростом содержания гидросиликатного геля с формированием вторичных низкоосновных новообразований цементного камня.

На основании полученных экспериментальных данных, установлены статистические зависимости между прочностью и K_f (рисунок 8).

Характеристики пористой структуры λ и однородности пор α , определенные по результатам исследования кинетики водонасыщения $W_t(t)$ по ГОСТ 12730-4-78, зависели от содержания АСС. Взаимосвязь этих показателей через значение максимального изменения массы образца W_{max} по формуле:

$$W_t(t) = W_{max} \left[1 - e^{-(\lambda_1 t)^\alpha} \right] \text{ приведена на рисунке 9.}$$

Относительные деформации образцов, обусловленные увеличением их длины от действия сульфатов, составляют менее 0,10% за 12 мес., что согласно требованиям ГОСТ Р 56687-2015 позволяет отнести разработанный композиционный цемент к сульфатостойкой группе.

Таблица 9 - Характеристики долговечности торкрет-бетонов

Состав	Прочность на сжатие, МПа	Марка по водонепроницаемости	Прочность на сжатие после количества циклов, МПа				Марка по морозостойкости	Потеря массы, %	Причина прекращения испытаний
			250	300	350	400			
ТБ1	56,9	W6	54,3 (-4,51%)	48,6 (-14,51%)	-	-	F ₁ 200	1,9	прочность
ТБ2	59,2	W6	59,0 (-0,41%)	57,5 (-2,84%)	-	-	F ₁ 200	2,1	масса
ТБ3	58,1	W6	57,8 (-0,52%)	56,6 (-2,63%)	-	-	F ₁ 200	2,1	масса
ТБ4	64,2	W8	60,3 (-6,07%)	58,6 (-8,56%)	52,3 (-18,50%)	-	F ₁ 300	1,9	прочность
ТБ5	72,3	W10	70,5 (-2,46%)	66,8 (-6,54%)	-	-	F ₁ 200	2,1	масса
ТБ6	68,8	W10	65,4 (-5,01%)	63,4 (-7,82%)	-	-	F ₁ 200	2,2	масса
ТБ7	68,5	W12	65,5 (-4,39%)	63,5 (-7,32%)	62,8 (-8,25%)	-	F ₁ 300	2,2	масса
ТБ8	76,5	W12	68,4 (-5,39%)	72,1 (-5,69%)	70,0 (-8,56%)	64,2 (-16,11%)	F ₁ 300	1,8	прочность
ТБ9	72,3	W12	65,5 (-6,39%)	66,9 (-7,47%)	65,4 (-9,58%)	-	F ₁ 300	2,1	масса
ТБ10	70,0	W14	65,5 (-6,39%)	64,3 (-8,10%)	63,0 (-9,95%)	-	F ₁ 300	2,2	масса
ТБ11	74,4	W16	70,5 (-5,23%)	69,6 (-6,50%)	68,6 (-7,85%)	-	F ₁ 300	2,3	масса
ТБ12	70,4	W16	66,6 (-5,27%)	65,0 (-7,71%)	64,7 (-8,04%)	63,9 (-9,24%)	F ₁ 300	2,2	масса

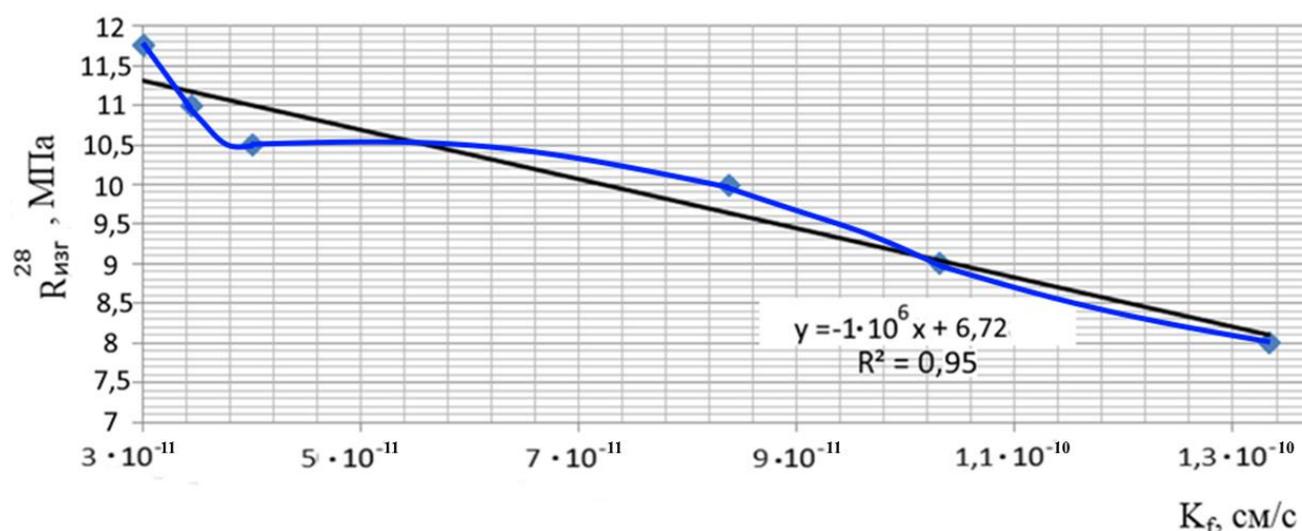


Рисунок 8 – Зависимость между прочностью торкрет-бетона на растяжение при изгибе и коэффициентом фильтрации K_f

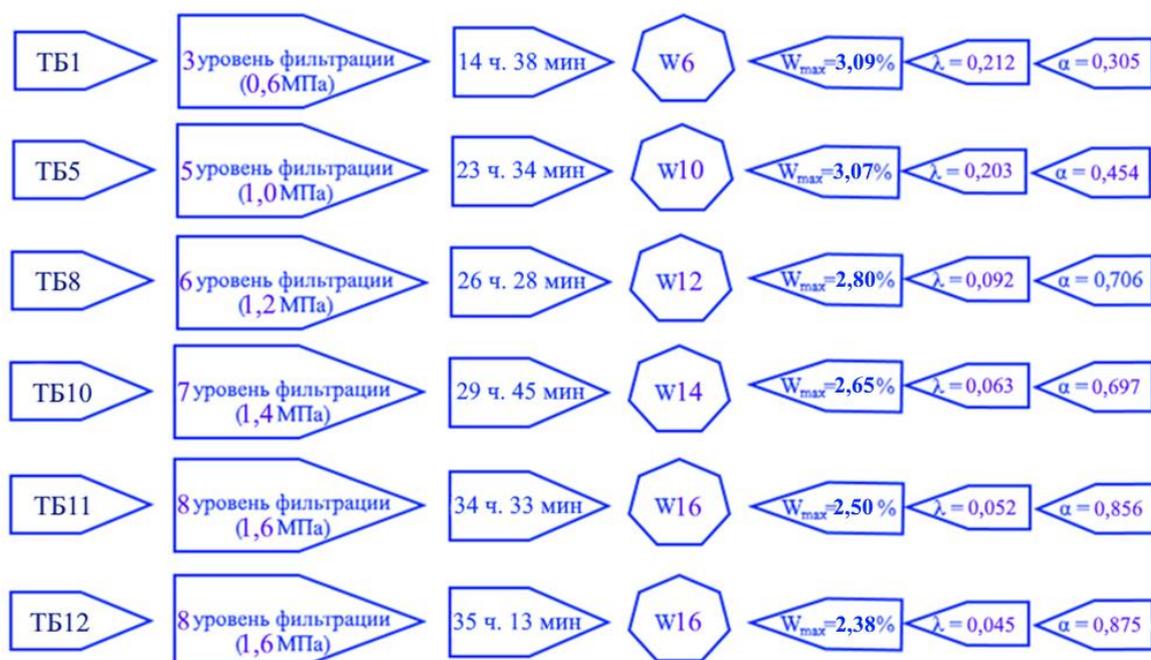


Рисунок 9 – Водонепроницаемость, водопоглощение и характеристики поровой структуры торкрет-бетонов

Торкрет-бетоны соответствуют ТУ 5745-00116216892-06 (таблица 10).

Апробация разработанных материалов проводилась при ремонте подвальных помещений в многоэтажных жилых домах в г. Владивостоке по адресам: ул. Космонавтов, дома 9, 11 и 13 (постройки 1973 г.) и в г. Артеме по адресам: ул. Кирова, дома 150 и 152 (1980 г.), а также при ремонте 5 подземных переходов: через пр-т 100 лет Владивостоку, ул. Гоголя, ул. Жигура, ул. Светланскую (все в г. Владивостоке) и подземного перехода через ул. Фрунзе (г. Артем).

Таблица 10– Соответствие разработанных торкрет-бетонов нормам

Характеристика	ТБ	ТУ 5745-00116216892-06
Классы прочности на сжатие	B30-B60	B30-B60
Классы прочности на растяжение при изгибе	Btb3,6-Btb6,0	Btb6,0- Btb8,0
Марка по удобоукладываемости	Ж2-Ж3 (20-22 с)	Ж2-Ж4 (20-60 с)
Адгезия, МПа	4,4	2
Конец схватывания, мин	225-360	не нормируется
Равномерность изменения объема (расширение), мм	$\leq 1,0$	0-1,5
Марка по водонепроницаемости	W6-W16	W4-W12
Марка по морозостойкости	F ₁ 200-F ₁ 300	F50-F1000
Стойкость к сульфатной коррозии	сульфатостойкий	не нормируется
Отскок, мас. %	≤ 8	не нормируется

В пятой главе осуществлена модернизация технологической линии производства композиционного цемента, а также торкрет-бетона на его основе, которая базируется на традиционном промышленном процессе изготовления бетонной смеси и строительных изделий. Результаты расчета условно-годовой экономии с

учётом максимальной производительности технологической линии 25 тысяч кубических метров бетонной смеси в год подтверждают значительный экономический эффект от внедрения разработанных материалов: 44 млн. руб. При этом затраты на производство АСС составляют 50 кВт-ч на 1 м³, что в 2 раза ниже (120 кВт-ч без учета обжига), чем для портландцемента. Энергозатраты на производство 1 м³ композиционного цемента составляют 61 кВт-ч, а на изготовление 1 м³ торкрет-бетонной смеси - 76 кВт-ч (0,0262 т у.т.)

Перспективность разработок диссертации подтверждена результатами апробации торкрет-бетонов на промышленных мощностях ООО «Артемспецстрой» и ООО «Специализированный застройщик УНР 2020», где опытные образцы подверглись всесторонним испытаниям. Подписаны протоколы о намерениях совместной работы и использования результатов.

Для внедрения полученных алюмосиликатов в качестве активных минеральных добавок в композиционные цементы был открыт производственный цех на базе ООО «Артемспецстрой» по обогащению золошлаковой смеси с годовой производительностью 10 000 т.

Подготовлены технологические регламенты на изготовление композиционных цементов и эффективных материалов для железобетонных сооружений, технические условия на продукцию и рекомендации по их применению. Важность применения вторичных ресурсов подтверждается вступившим в силу с 1 марта 2024 г. распоряжением Правительства РФ N 2094-р от 2023 г.

Доказано, что разработанные материалы имеют высокий потенциал для ремонта железобетонных сооружений, что подтверждено при выполнении работ по усилению 5 подвальных помещений в многоэтажных жилых домах и 5 подземных переходов в г. Владивостоке и г. Артеме. Кроме того, ООО «СЗ Патрокл» заинтересовано в приобретении торкрет-бетонов, разработанных при подготовке диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук для применения их при ремонте железобетонных сооружений в г. Владивостоке. Ремонт планируется в 2024 гг. с годовой потребностью 10 000 м³ торкрет-бетонной смеси.

После землетрясения в феврале 2023 г. в Турции в наш адрес обратилась турецкая строительная фирма ASEB SAATIN, с которой подписан протокол о намерениях внедрения результатов диссертации для выполнения ремонта железобетонных сооружений в провинциях Газиантеп и Хатай в 2024-2025 гг. Также подписан протокол о намерениях внедрения результатов диссертации в отечественных районах (Камчатский край) силами ООО «Наладка-ДВ» в 2024-2025 гг. в количестве 12000 м³ торкрет-бетона.

Теоретические и практические положения диссертационного исследования применяются в учебном процессе при подготовке специалистов по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», а также бакалавров и магистров по направлениям подготовки 08.03.01 и 08.04.01 «Строительство», в том числе, при выполнении научно-исследовательских и выпускных квалификационных работ в ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет».

Широкомасштабное внедрение результатов диссертационной работы позволит получить значительный экономический эффект и защитить население от негативного воздействия природных и техногенных аномальных воздействий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. В развитие теории бетоноведения получены новые данные о технологических способах получения торкрет-бетонных смесей на основе композиционных цементов посредством энергосберегающих технологических процессов (усовершенствованы параметры флотации, магнитной сепарации и измельчения).

Предложено научно обоснованное технологическое решение получения торкрет-бетона на композиционном цементе, заключающееся в применении техногенных ресурсов на основе отходов промышленности (золошлаковых смесей) и строительства (бетонного лома от разборки зданий и сооружений), активированных и гомогенизированных в вибрационной мельнице, которое позволяет управлять процессами структурообразования за счет сродства структур и формирования высокопрочных новообразований. Разработанная торкрет-бетонная смесь с низким значением отскока (<8%) обеспечивает уплотнение и упрочнение адгезионной контактной зоны с базовым материалом бетонной стены, приводя к более эффективной передаче нагрузок между слоями и увеличивая общую несущую способность всей конструкции.

Обоснован механизм управления структурообразованием высокоплотного (показатель средней размерности открытых капиллярных пор $\lambda=0,052$, показатель однородности размеров открытых капиллярных пор $\alpha=0,856$) бетонного композита, основанный на комплексном эффекте компонентов композиционного цемента (алюмосиликатной составляющей и бетонного лома, подобранных и подготовленных по авторской технологии) рационального состава и гранулометрии. При усилении несущих железобетонных стен торкрет-бетоном на композиционных цементах адгезия между базовым и ремонтным слоями стены возрастает в 1,5 раза по сравнению с традиционным торкрет-бетоном.

Впервые выявлены закономерности влияния различных факторов (состава и пропорции исходных компонентов, параметров их помола) на повышение комплекса эксплуатационных характеристик ремонтных материалов: марки по водонепроницаемости до W16, водопоглощения менее 6 мас. %, марки по морозостойкости выше F₁₃₀₀. Научно обоснованы зависимости между количеством введенных алюмосиликатов из обогащенной золошлаковой смеси (до 35 мас. %), физико-механическими свойствами и характеристиками поровой структуры цементных композитов, в частности снижается показатель средней размерности открытых капиллярных пор в 4 раза и повышается показатель однородности размеров открытых капиллярных пор в 3 раза, что способствует существенному повышению прочностных свойств и эксплуатационных характеристик торкрет-бетонов.

Апробация технологии производства и выпуск опытных партий композиционных цементов осуществлялись на мощностях ООО «Артемспецстрой» (г. Артем). Апробация и внедрение разработанных торкрет-бетонов проводилась ООО «СЗ Патрокл» и ООО «СЗ УНР 2020» (г. Владивосток) при ремонте железобетонных сооружений.

Применение разработанных ремонтных материалов при укреплении действующих сооружений оказывается в десятки раз более экономически выгодным по

сравнению с новым строительством. Разработаны практические **рекомендации** по внедрению результатов диссертации как в сферу производства строительных материалов, так и при ремонте железобетонных сооружений, а также в учебный процесс.

Перспективы дальнейших исследований направлены на расширение номенклатуры строительных материалов различного целевого назначения на композиционном цементе с применением местного природного и техногенного сырья различных регионов России.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. *Лесовик, В.С.* Торкрет-бетоны и инъекционные растворы для комплексного ремонта подземных сооружений / В.С. Лесовик, Р.С. Федюк, **И.И. Панарин** // Academia. Архитектура и строительство. - № 1. - 2023. - С. 89–95. (К1)
2. *Лесовик, В.С.* Влияние состава на свойства и строение модифицированных цементных композитов / В.С. Лесовик, Р.С. Федюк, Ю.Л. Лисейцев, **И.И. Панарин**, В.В. Воронов // Строительные материалы. - 2022. - №9. - С. 39-49. (К1)
3. *Панарин, И.И.* Усиление конструкций подземных сооружений торкрет-бетоном / И.И. Панарин, Р.С. Федюк, Д.С. Меркулов // Строительные материалы и изделия. - 2022. - Том 5. № 6. - С. 5-18. (К2)

В изданиях, индексируемом в базах данных Scopus и Web of Science

4. *Auyesbek, S.* Man-Made Raw Materials for the Production of Composite Silicate Materials Using Energy-Saving Technology / S. Auyesbek, N. Sarsenbayev, A. Abduova, B. Sarsenbayev, S. Uderbayev, Z. Aimenov, G. Kenzhaliyeva, U. Akishev, T. Aubakirova, G. Sauganova, E. Emanov, O. Kolesnikova, **I. Panarin** // Journal of Composites Science. - 2023. – Vol. 7. – 124.
5. *Panarin, I.I.* Low-permeability cement materials for underground structures / I.I. Panarin, O.I. Litvinets, V.E. Okhotkina, I.V. Moskovaya // AIP Conference Proceedings. - 2023. - Vol. 2758. - 020021.
6. *Muratov, B.* Physico-chemical Study of the Possibility of Utilization of Coal Ash by Processing as Secondary Raw Materials to Obtain a Composite Cement Clinker / B. Muratov, A. Kolesnikov, S. Shapalov, S. Syrlybekkyzy, I. Volokitina, D. Zhunisbekova, G. Takibayeva, F. Nurbaeva, T. Aubakirova, L. Nurshakhanova, **I. Panarin** // Journal of Composites Science. - 2023. – Vol. 7. – 234.

В рецензируемых российских изданиях, включенных в базу РИНЦ

7. *Панарин, И.И.* Перспективы развития материалов для подземных сооружений / И.И. Панарин // Инженерное дело на Дальнем Востоке России: Мат-лы VII Всеросс. науч.-практ. конференции. - Владивосток: ВУЦ ДВФУ. - 2023. - С. 9-11.
8. *Таскин, А.В.* Строительные материалы и минеральные вяжущие вещества на основе гидратированных золошлаковых отходов углесжигающих электростанций и отходов углеобогащения / А.В. Таскин, Т.Г. Черкасова, Р.С. Федюк, В.И. Пе-

тухов, Д.Р. Федотов, Н.Д. Кулаков, Е.А. Матвеев, **И.И. Панарин** // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. - 2023. - Том 14. № 4. - С. 201-206.

9. *Примчук, А.Г.* Способ обогащения золошлаковых смесей тепловых электростанций для производства строительных вяжущих / А.Г. Примчук, Р.С. Федюк, **И.И. Панарин**, П.Г. Козлов, С.В. Вавренюк // Химия. Экология. Урбанистика : матер. всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием) : в 4 т. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2023. - С. 256-261.

Объекты интеллектуальной собственности

10. Пат. 2786125 РФ, МПК, С04В28/04. Бетонная смесь / Р.С. Федюк, **И.И. Панарин**, Ю.Л. Лисейцев, В.В. Потапов, ФГАОУ ВО ДВФУ. – 2022101932; заявл. 28.01.2022, опубл. 19.12.2022, Бюл. №35.

11. Пат. 2801028 РФ, МПК, С04В38/02. Бетонная смесь / В.С. Лесовик, С.В. Ключев, Р.В. Лесовик, Сяо Вэньсюй, Р.С. Федюк, **И.И. Панарин**, ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023106793; заявл. 22.03.2023, опубл. 01.08.2023, Бюл. №22.

12. Пат. 2806396 РФ, МПК, В03В9/04. Способ обогащения золошлаковых смесей тепловых электростанций для производства строительных вяжущих / В.С. Лесовик, С.В. Ключев, Р.В. Лесовик, Сяо Вэньсюй, Р.С. Федюк, **И.И. Панарин**, П.Г. Козлов, ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023114115; заявл. 30.05.2023, опубл. 31.10.2023, Бюл. №31.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ЦЕМЕНТЫ, АКТИВИРОВАННЫЕ ОБОГАЩЕННЫМИ ЗОЛОШЛАКОВЫМИ СМЕСЯМИ, И ТОРКРЕТ-БЕТОНЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Специальность 2.1.5 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 8.05.2024 г. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,31
Тираж 100 экз. Заказ № 1

Отпечатано в Дальневосточном федеральном университете
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10