

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

ПАНАРИН ИГОРЬ ИВАНОВИЧ

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

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент,
Федюк Р.С.

Владивосток-2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР.....	11
1.1. Объекты городской инфраструктуры, подлежащие реконструкции и ремонту	11
1.2. Проблемы износа городских сооружений и способы восстановления их эксплуатационной способности	20
1.3. Материалы и технологии для ремонта стен городских сооружений	22
1.4. Вопросы применения торкрет-бетонов	27
1.5. Использование техногенных отходов промышленности и строительства при проведении ремонтно-восстановительных работ	31
1.6. Выводы.....	36
2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	37
2.1. Исходные сырьевые материалы	37
2.2. Методы экспериментальных исследований.....	42
2.2.1. Исследование микроструктуры материалов	44
2.2.2. Исследование технологических свойств смесей	47
2.2.3. Изучение физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик разработанных материалов	47
2.2.4. Исследование свойств торкрет-бетонов на различных строительных объектах	50
2.3. Математическое планирование экспериментов	55
2.4. Выводы.....	57
3. РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ ЦЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ.....	58
3.1. Обогащение золошлаковых смесей с выделением их алюмосиликатной составляющей.....	58
3.2. Проектирование состава и изучение свойств композиционного цемента с использованием обогащенных золошлаковых смесей.....	62
3.2.1. Проектирование состава и изучение свойств композиционного цемента	62
3.2.2. Физико-механические и технологические свойства композиционных цементов.....	75

3.3. Выводы.....	86
4. СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ТОРКРЕТ-БЕТОНОВ НА КОМПОЗИЦИОННЫХ ЦЕМЕНТАХ.....	88
4.1. Разработка составов торкрет-бетонов.....	88
4.2. Исследование ударной стойкости торкрет-бетонов.....	94
4.3. Эксплуатационные характеристики торкрет-бетонов	100
4.4. Использование торкрет-бетонов при усилении железобетонных конструкций зданий и сооружений.....	105
4.5. Выводы.....	110
5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВО	112
5.1 Техничко-экономическая эффективность обогащения золошлаковых смесей с целью извлечения алюмосиликатной составляющей.....	112
5.2 Техничко-экономическое обоснование перспективности производства и применения торкрет-бетонов на композиционных цементах	114
5.3. Техничко-экономическая эффективность применения торкрет-бетонов .	119
5.4. Разработка и внедрение технологии изготовления композиционных цементов и торкрет-бетонов на его основе	121
5.5. Выводы.....	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
ЛИТЕРАТУРА	132
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	148
Приложение А.....	149
Приложение Б.....	157
Приложение В	159
Приложение Г.....	160

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Строительная отрасль требует применения эффективных материалов, обеспечивающих возрастающие требования 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 кольматации 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 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.

Теоретическая и практическая значимость работы. 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).

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.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

1.1. Объекты городской инфраструктуры, подлежащие реконструкции и ремонту

Российские города населяет три четверти всех жителей страны, а 24% соотечественников проживают в городах с населением более миллиона человек. Этим городам 16 с перспективой возрасти до 20 [1]. Помимо этого, в Российской Федерации имеется более трехсот моногородов, которые сформированы вокруг градообразующих предприятий, являющихся научными и промышленными центрами, крупнейшими из которых являются Норильск, Новокузнецк, Магнитогорск, Благовещенск, Тольятти, Нижний Тагил, Новосибирск, Новоульяновск, Чапаевск, Златоуст [2]. Исходя из этих фактов, наша страна относится к высокоурбанизированным государствам [3].

Высокая степень урбанизации значительно влияет на развитие мегаполисов. Поэтому все большее значение уделяется точечной застройке, созданию спальных и административных районов. Это приводит к значительной концентрации населения на определенных территориях, резко ограниченных условиями проживания или функциональными требованиями [4-6].

Для эффективной жизнедеятельности городского населения возводятся объекты городской инфраструктуры, которые включают в себя все физические структуры, службы и системы, необходимые для функционирования города и обеспечения его жителей основными услугами, такими как:

1. Транспорт: дороги, мосты, железнодорожные пути.
2. Коммунальные услуги: системы водоснабжения, канализации, газоснабжения, электроснабжения, телекоммуникации, интернета.
3. Здравоохранение: больницы, поликлиники, аптеки, медицинские центры, стоматологии.
4. Образование: школы, детские сады, колледжи, университеты, библиотеки.

5. Безопасность: полиция, пожарная охрана, спасательные службы.
6. Культура и отдых: музеи, театры, кинотеатры, парки, скверы, спортивные объекты.
7. Торговля и услуги: магазины, рестораны, кафе, банки, почтовые отделения.
8. Жилищный фонд: многоквартирные дома, частные дома, общежития, арендное жилье.
9. Промышленность и бизнес-инфраструктура: офисные здания, склады, логистические центры [4].

Использование подземного пространства в крупных городах имеет ряд преимуществ и является эффективным способом решения различных проблем, связанных с ограниченностью земельных ресурсов и нехваткой свободных пространств. Вот несколько аспектов использования подземного пространства в гражданских целях в крупных городах:

1. Для размещения инфраструктурных объектов, таких как метро, подземные тоннели для дорожного транспорта, телекоммуникационные и электроэнергетические сети. Это позволяет снизить нагрузку на наземные дороги и улучшить транспортную доступность города.

2. Жилые и коммерческие объекты, например, подземные торговые центры, паркинги, склады, спортивные сооружения и другие объекты эффективны для размещения под землей, что позволяет сэкономить ценное наземное пространство.

3. Зеленые зоны и парки, например, подземные сады, ботанические сады, оранжереи и другие объекты могут быть размещены под землей, что позволяет сохранить или создать зеленые площади в городах с ограниченными возможностями для озеленения.

4. Экологическая устойчивость, например, подземные системы для утилизации отходов, очистки воды и хранения энергии имеют потенциал реализации для снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Однако использование подземного пространства также требует учета ряда факторов, включая геологические условия, инженерные решения для

обеспечения безопасности и устойчивости подземных сооружений, а также социальные и экономические аспекты [3].

Вопросам освоения подземного пространства городов посвящены работы ведущих ученых и специалистов в области подземного строительства, горных наук и геомеханики [3-6], в том числе по проектированию и строительству подземных сооружений [7-17]. Однако, вопросы комплексного исследования технологических параметров подземных сооружений двойного назначения, обеспечивающих их техническую эффективность и выполнение защитных функций в угрожаемый период, малоизучено.

Согласно аудиторам Счетной палаты РФ [17], из 16270 защитных сооружений, состоящих на учете в МЧС РФ в качестве объектов гражданской обороны (ГО), 95% являются непригодными для эксплуатации по прямому назначению из-за износа.

В частности, в Челябинске имеется 430 защитных сооружений ГО, которые способны укрыть только 15% населения города. По данным Управления МЧС по г. Санкт-Петербургу, в городе находятся 4012 объектов гражданской обороны, рассчитанных на 1 млн. человек (при численности населения города более 5 млн. человек). По информации сотрудников МЧС РФ, Новосибирск имеет более 800 защитных сооружений (включая метро), что обеспечивает защиту только 200 тыс. человек [18]. Такая же ситуация сложилась и в других крупных городах (рисунок 1.1).

Несмотря на разрушительную силу некоторых стихийных бедствий, они происходят не так часто, а менее серьезные природные явления не требуют применения специальных защитных сооружений (рисунок 1.2). Поэтому защитные сооружения рассчитываются на применение средств поражения современного оружия.

Согласно указаниям [31], все убежища должны быть способны ослаблять проникающую радиацию с помощью ограждающих конструкций с коэффициентом ослабления, равным 1000. Также они должны обеспечивать защиту от воздействия избыточного давления во фронте сейсмозрывной волны,

равного *100 кПа*. Важно отметить, что стандартные городские подземные сооружения рассчитаны на разрушение при давлении 70 кПа.

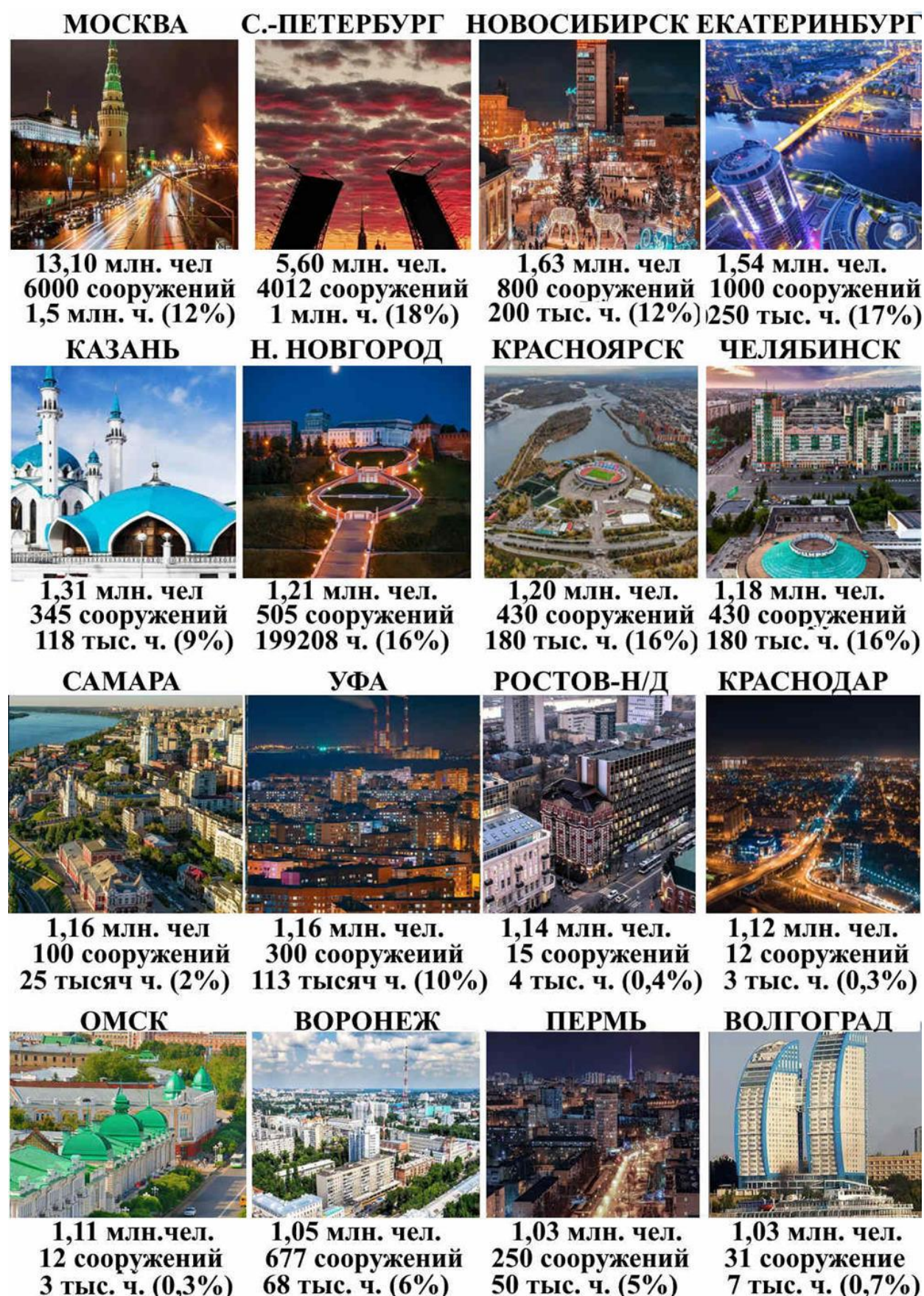


Рисунок 1.1 – Обеспеченность крупнейших городов РФ защитными сооружениями (на 2023 год) [2, 18-30]

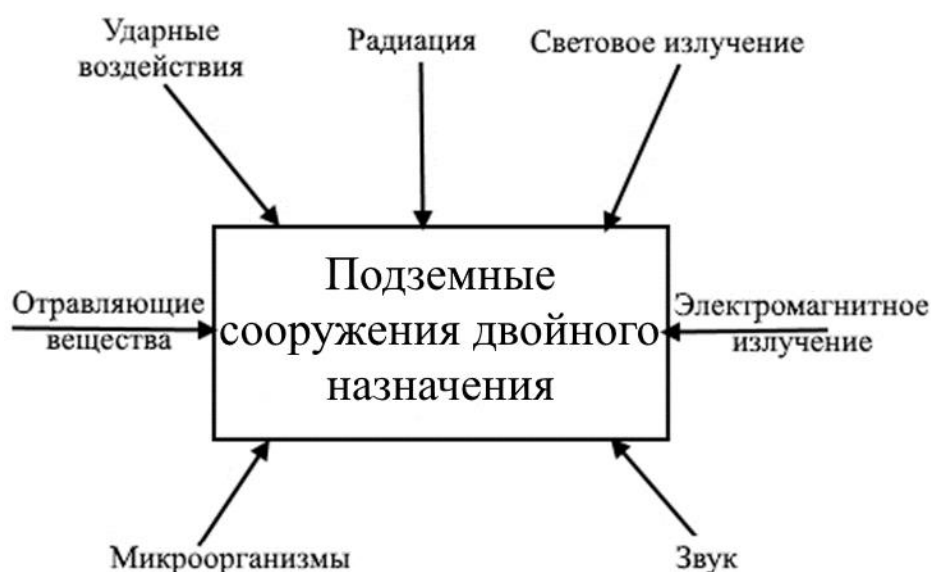


Рисунок 1.2 - Система воздействия на городские подземные сооружения

Убежища должны быть оснащены всем необходимым для выживания, включая пищу, питьевую воду, медикаменты, системы вентиляции и очистки воздуха, а также системы электроснабжения и связи. Убежища рекомендуется располагать в местах наибольшего сосредоточения укрываемых, при этом необходим выбор зданий с наименьшей этажностью. Такие здания обеспечивают более устойчивую конструкцию и лучшую защиту от различных опасностей.

Однако, при размещении убежищ в зданиях наименьшей этажности, необходимо предусмотреть технические решения для обеспечения возможности выхода укрываемых в случае завала прилегающей территории обломками разрушенных наземных зданий и сооружений. Это включает использование запасных (аварийных) выходов, специальных систем эвакуации, механизмов для удаления преград и т.д. Целью таких решений является обеспечение безопасного и эффективного покидания убежища в случае необходимости.

Важно учесть, что при проектировании убежищ и их размещении следует учитывать различные факторы, такие как географические особенности, геологические условия, доступность и доступные ресурсы. Технические решения должны быть проработаны с учетом специфических требований и потребностей каждого конкретного убежища и его местоположения. Главная

цель заключается в обеспечении максимальной защиты и безопасности укрываемых в случае чрезвычайных ситуаций [30-39].

Сооружения, главные части которых по эксплуатационным характеристикам расположены под землёй, называют подземными. Конструкции подземных сооружений двойного назначения подвержены ряду динамических воздействий [40]. Действие динамических нагрузок подразделяется на местное и общее. Местные нагрузки обычно связаны с ударами по конструкции твердыми телами, например, при ядерном взрыве возможно попадание осколков на защитные сооружения. Общие нагрузки, с другой стороны, обусловлены действием ударной волны, которая распространяется от ядерного взрыва. Эта ударная волна вызывает значительные силовые воздействия на защитные сооружения и опасна для их целостности.

При проектировании защитных сооружений, таких как убежища, необходимо учитывать и местные, и общие динамические нагрузки. Это включает анализ прочности конструкции под воздействием удара твердым телом, а также учет силовых воздействий от ударной волны. Расчеты и моделирование позволяют определить необходимые меры защиты и обеспечить надежность сооружений в условиях ядерного взрыва.

Одним из подходов к защите от действия общих динамических нагрузок является использование амортизирующих материалов, которые способны поглощать и развести энергию ударной волны. Также важно учесть возможность деформации элементов и диссипации энергии в конструкции защитных сооружений.

Кроме того, при проектировании убежищ необходимо учитывать и другие факторы, такие как защита от радиации, обеспечение вентиляции и поддержания жизнеобеспечения, а также предусмотреть системы оповещения и эвакуации в случае аварийной ситуации [38].

Для России, являющейся высоко урбанизированной страной, актуальным является обеспечение сейсмической безопасности зданий и сооружений.

Наша страна характеризуется наличием большого количества сейсмически опасных зон (рисунок 1.3) [41], что требует обязательного учета при проектировании и строительстве.

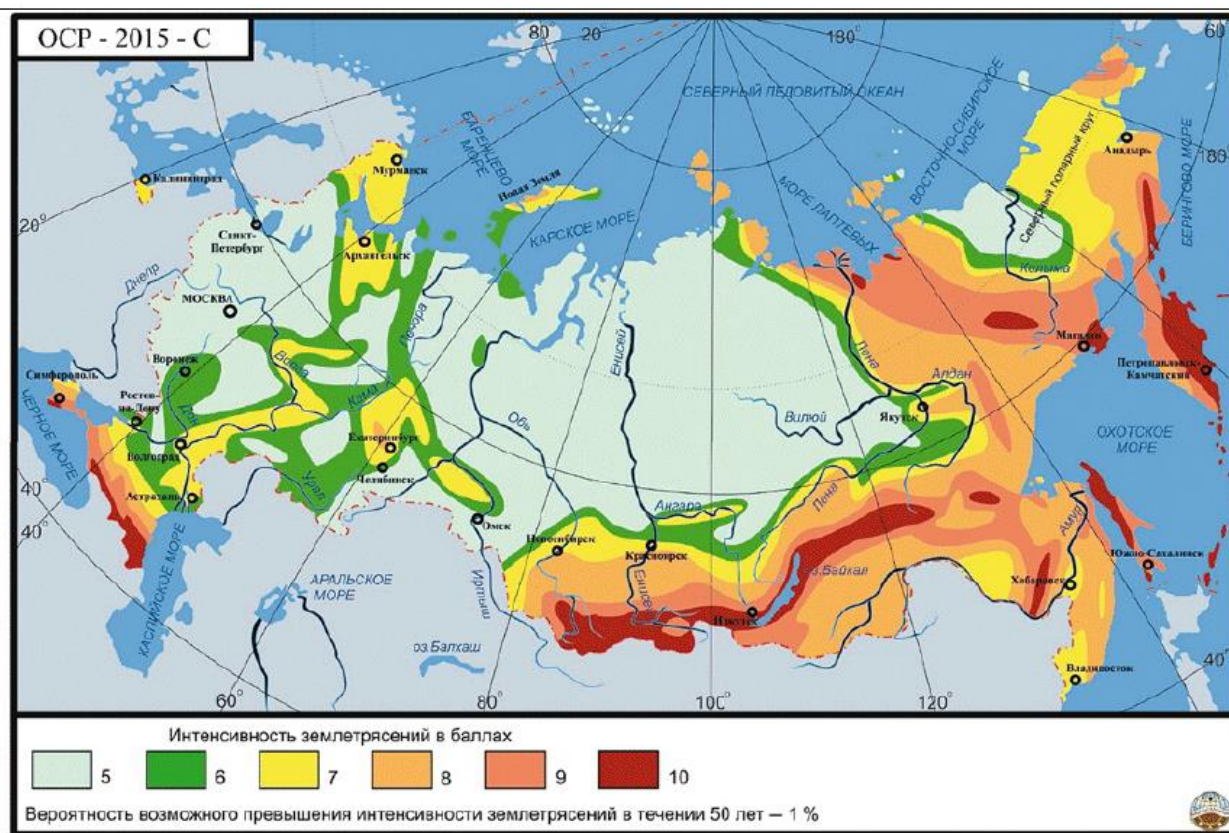


Рисунок 1.3 – Сейсмическое районирование территории России

В соответствии с требованиями СП 14.13330.2018, сейсмические воздействия учитываются при проектировании новых объектов, если район строительства характеризуется потенциальной сейсмической активностью не ниже 7 баллов. При этом, скальные грунты ослабляют на 1 балл исходную сейсмичность района строительства.

Анализ нормативной и проектной документации показал, что сооружения с сейсмозащитой и защитные объекты гражданской обороны имеют схожие характеристики.

В современных конструктивных решениях для повышения сейсмостойкости не всегда достаточно просто увеличить размеры сечений, прочность и вес. Это приводит к увеличению инерционной сейсмической нагрузки, но не всегда экономически эффективна.

Для достижения более эффективной сейсмозащиты требуются новые методы и технологии. Одним из таких методов является использование адаптивных систем сейсмозащиты, которые позволяют изменять массу, жесткость или демпфирование конструкции в зависимости от ее перемещений и скоростей. Например, адаптивные системы включают использование амортизаторов, которые изменяют свои свойства в зависимости от силы и скорости воздействия. Это помогает поглощать и распределять энергию сейсмической нагрузки, снижая ее воздействие на конструкцию. Также применяются системы массовых амортизаторов, которые позволяют изменять массу конструкции в зависимости от ее перемещений. Это позволяет уменьшить инерционную сейсмическую нагрузку и снизить напряжения, возникающие в конструкции.

Другие методы сейсмозащиты включают использование базовых изоляторов, которые разделяют конструкцию от основания и снижают передачу сейсмических вибраций, а также использование активных систем контроля и управления, которые выполняют мониторинг и реагируют на сейсмическую активность.

Все эти методы и технологии позволяют создавать более эффективные системы сейсмозащиты, которые повышают сейсмостойкость конструкций и обеспечивают их безопасность в случае землетрясения [42]. В тоже время градостроительные требования к строительству гражданских объектов в сейсмоопасных районах существенно ниже [43].

Во многих странах существуют строительные сооружения, которые не соответствуют действующим сейсмическим нормам. Некоторые из них находятся на недопустимом уровне сейсмического риска, что означает, что их надежность подвергается сомнению в случае землетрясения. Причины такого недостаточного соответствия различны. Некоторые сооружения построены до введения современных сейсмических норм и стандартов, или не были модернизированы в соответствии с новыми требованиями. В некоторых случаях неправильное проектирование, использование некачественных материалов или недостаточный строительный контроль также приводят к ненадежности

сооружений в случае землетрясения. Однако существуют меры и программы, направленные на улучшение сейсмической безопасности существующих сооружений. Это включает ретрофитинг, то есть модернизацию и усиление уже построенных сооружений, чтобы они соответствовали современным сейсмическим нормам. Также проводятся обучающие программы и кампании для повышения осведомленности о сейсмической безопасности, правильного проектирования и строительства. Важно, чтобы государственные органы, строительные компании и проектировщики принимали сейсмическую безопасность во внимание при разработке и строительстве новых сооружений, а также при модернизации существующих. Это поможет снизить риск человеческих жертв и разрушений в случае землетрясений и обеспечить более надежную и безопасную среду для жизни и работы [44].

Землетрясение магнитудой 8,6 баллов по шкале Рихтера сравнимо с действием 1 млн. ядерных бомб мощностью 100 кт. Учитывая схожие геодинамические механизмы разрушения от действия сейсмических и сейсмозрывных волн, при оценке готовности к эксплуатации объектов, построенных с учетом сейсмозащиты (то есть в сейсмически опасных районах), можно условно принимать, что они имеют высокую степень защиты от взрывного воздействия [45].

Очевидно, что только увеличением толщины несущих конструкций невозможно достичь защиты от сейсмических волн выше 9 баллов. Необходимо применение демпфирующих элементов различного конструктивного исполнения, способных эффективно поглощать сейсмозрывные волны [46].

С другой стороны, подземные сооружения, построенные в сейсмоопасных районах с учетом современных нормативных требований, способны обеспечить техническую эффективную эксплуатацию в качестве защитных сооружений без мероприятий по дооборудованию. Объекты, построенные по современным сейсмическим нормам (СП 14.13330.2018) и рассчитанные на сейсмичность выше 7 баллов, не требуют дополнительных мероприятий при подготовке их к эксплуатации в качестве защитных (после оценки степени износа) [47].

Подземные объекты городской инфраструктуры рассчитаны на противодействие вертикальных нагрузок от расположенных над ними объектов. Объекты ГО строятся с учетом сейсмических колебаний, (горизонтальные нагрузки) которые передаются на несущие конструкции не только с поверхности, но и через вмещающие горные породы. Поэтому это учитывается при проектировании. Особенно важное значение это приобретает при учете сейсмозрывных волн [48].

Расположение подземных сооружений в сейсмоопасных районах не гарантирует наличие у них соответствующих защитных характеристик. Это связано, как с проектированием сооружений по предыдущим нормам, не предусматривающим сейсмозащиту, так и с частичной потерей несущей способности конструкций в ходе эксплуатации. Поэтому при оценке защитного потенциала подземной сети населенного пункта, необходимо в обязательном порядке учитывать их имеющуюся сейсмическую защиту, а в случае ее отсутствия, планировать возможность заблаговременного осуществления соответствующих мероприятий [49].

Таким образом, несмотря на огромное количество и разнообразие городских сооружений, они должны обеспечивать эффективную и безопасную работу при различных экстремальных условиях, как природного, так и техногенного происхождения.

1.2. Проблемы износа городских сооружений и способы восстановления их эксплуатационной способности

Износ городских сооружений - это процесс ухудшения состояния зданий, дорог, инфраструктуры и других объектов города из-за различных факторов, таких как время, интенсивное использование, воздействие окружающей среды и ошибки проектирования. Износ приводит к снижению безопасности, увеличению затрат на обслуживание и ограничению функциональности объектов. Для предотвращения износа необходимо проводить регулярные

осмотры, техническое обслуживание и ремонт объектов городской инфраструктуры.

А.А. Васильев [50] представил целый ряд методик определения физического износа зданий и сооружений, в том числе и их отдельных конструктивных элементов. Согласно И.Ю. Иванову [51], определенный физический износ сооружений происходит в результате их подработки при строительстве подземных объектов. В.С. Леджинов [52] занимался систематизацией методов оценки физического износа зданий и сооружений. И.В. Максимова [53] в результате мониторинга эксплуатационного износа зданий и сооружений разработала матрицу организации капитальных и текущих ремонтов. К.В. Рожнов [54] занимался оценкой функционального износа морских причальных гидротехнических сооружений.

Физический износ вносит значительный вклад в общий накопленный износ зданий и сооружений [55]. Общий накопленный износ зданий и сооружений - это сумма всех видов износа, которые произошли с момента строительства объекта. Он включает физический износ, моральный износ, внешний износ и другие факторы, которые влияют на стоимость объекта. Общий накопленный износ используется для определения текущей стоимости объекта, а также для принятия решений о ремонте, модернизации или замене объектов.

Х.А. Рамос-Герреро [56] с коллегами разработали систему инклюзивной вероятностной оценки жизненного цикла зданий на предмет землетрясения и физического износа. А.С. Санта и др. [57] изучали атмосферный физический износ керамических строительных материалов. Х. Юк и др. [58] проверяли образование твердых частиц из-за разрушения строительных материалов как причины образования мелкой пыли в помещении. С.-В. Женг и др. [59] проводили вероятностную оценку сейсмического риска жизненного цикла высотных зданий с учетом ухудшения состояния, вызванного карбонизацией. Чилийские авторы А.Д. Прието с коллегами [60] изучали влияние глобального изменения климата на физический износ зданий и сооружений. Греческие ученые [61] исследовали физический износ европейских жилых зданий. Пример изношенных вакуумных изоляционных панелей на фасаде здания приведен в

статье швейцарских ученых [62]. В.А. Субботин и И.А. Субботин [63] изучили причины разрушения наружных эффективных кирпичных стен на примере строящихся зданий.

Определенный ряд аспектов физического износа воздействует и на сельские здания и сооружения. Канадские ученые [64] исследовали сульфатную и сульфидную коррозию бетонных конструкций в животноводческих помещениях. Чешский коллектив [65] оценил риск разрушения древесины из-за влаги на основе диффузионной модели. Французско-испанская коллаборация ученых [66] изучила влияние отделки поверхности и состава на разрушение строительных каменных изделий, подвергающихся воздействию кислой атмосферы.

Итальянские ученые [67] исследовали влияние загрязнения воздуха на разрушение карбонатных строительных материалов в городской среде Италии. Американские исследователи [68] занимались стохастическим моделированием износа зданий и гражданской инфраструктуры. Хорошие результаты получаются при прогнозировании износа фасада с использованием методов машинного обучения на основе объективных параметров и данных электронного участия [69].

Таким образом, всесторонний анализ трудов отечественных и зарубежных ученых доказывает, что на здания и сооружения городской инфраструктуры действует большое число воздействий, приводя к физическому износу. Поэтому необходимо проводить усиление несущих конструкций этих объектов с применением современных эффективных строительных материалов.

1.3. Материалы и технологии для ремонта стен городских сооружений

Восстановление несущей способности - это процесс увеличения прочности и жесткости конструкции или элемента, который утратил свои первоначальные характеристики из-за износа, повреждений или ошибок проектирования. Для восстановления несущей способности могут использоваться различные методы, такие как усиление конструкций, замена поврежденных элементов, изменение

нагрузок и другие. Важно выбирать наиболее эффективные и экономически выгодные методы для каждого конкретного случая.

Армирование и нанесение торкрет-бетона (набрызг-бетона) является одним из методов повышения несущей способности стен зданий и сооружений. Этот метод позволяет усилить существующую структуру, увеличив ее прочность и устойчивость к нагрузкам. Армирование подразумевает введение арматурных стержней или сетки в стену или фундамент с последующим нанесением торкрет-бетона (или наоборот: сначала торкретирование, потом вдавливание арматурного каркаса). Арматура предоставляет дополнительную прочность и жесткость конструкции, а торкрет-бетон служит для защиты арматуры от коррозии и обеспечения дополнительной несущей способности. Толщина наносимого торкрет-бетона зависит от необходимой степени усиления и требуемой прочности конструкции. В случае повышения несущей способности стен подземных сооружений и цокольных этажей, толщина торкрет-бетона достигает 20 см или более. Это позволяет обеспечить достаточную защиту арматуры и увеличить прочность конструкции. Однако при проектировании и выполнении работ по армированию и нанесению торкрет-бетона необходимо учитывать требования и рекомендации соответствующих норм и стандартов, что позволит разработать и реализовать оптимальный план усиления и повышения несущей способности стен и фундаментов зданий [70-71].

При усилении несущих конструкций зданий и сооружений проводится индивидуальная оценка каждого объекта с учетом различных факторов, включая расчет нагрузки от ударной волны. Оценка силы взрыва осуществляется на основе характеристик самого взрывного материала и его расположения относительно объекта. Расстояние от источника взрыва до объекта также учитывается, поскольку с увеличением расстояния сила ударной волны ослабевает.

На основе этих данных и проведения соответствующих расчетов определяется способ и степень усиления подземных сооружений. Это включает применение различных методов усиления, таких как армирование, тампонаж, использование специальных упрочняющих материалов и другие техники. Важно

учесть, что оценка и усиление подземных сооружений в случае взрыва требует высокой квалификации и опыта со стороны специалистов в области горного дела, инженерии грунтов и строительства. Только такая комплексная оценка и применение соответствующих методов позволят обеспечить безопасность и надежность подземных сооружений в условиях взрывной нагрузки [72].

Подземные части зданий и сооружений испытывают давление от окружающего грунта, которое создает усилия, направленные на стенки сооружения, вызывая сжатие и изгиб (рисунок 1.4). Сжатие возникает в результате вертикального давления грунта, которое действует на стенки сооружения. Это приводит к сжатию материала, из которого изготовлены несущие (ограждающие) конструкции, и созданию усилий, направленных внутрь сооружения. Изгиб возникает из-за разницы в боковом давлении грунта на разных глубинах. Это создает неравномерные силы, которые могут вызывать изгиб в несущих (ограждающих) конструкциях. При проектировании несущих (ограждающих) конструкций подземных частей зданий и сооружений учитываются эти силы и проводятся расчеты, чтобы обеспечить достаточную прочность и устойчивость сооружения под воздействием бокового давления грунта. Материалы и форма конструкции выбираются таким образом, чтобы справиться с эти нагрузками и предотвратить деформации или разрушение сооружения.



Рисунок 1.4 – Работа несущих элементов подземных объектов

Толщина стены определяется требованиями к прочности и устойчивости сооружения, а также давлением грунта, которому она будет подвергаться (таблица 1.1) [73]. Важно отметить, что толщина стены также может быть увеличена для учета дополнительных факторов, таких как наличие воды, подземных вод, нагрузок от окружающей среды и требований к звукоизоляции или теплоизоляции. Конечная толщина стены подземного сооружения должна быть определена проектировщиками в соответствии с требованиями проекта, строительными нормами и правилами.

Таблица 1.1 – Конструктивные характеристики несущих конструкций подземных сооружений

Материал	Высота этажа, м		Требуемая толщина стены, см	Защита от давления ударной волны, кПа
	Стена без бокового опирания	Стена с боковым опиранием		
Монолитный бетон (до В12,5)	2	2,8	35	25
Монолитный бетон (выше В12,5)	2	2,8	30	30
Ж/б блоки	2	3	34	20

Для монолитной армированной бетонной стены обычно применяются расчеты и нормативы, которые определяют минимально допустимую толщину стены в зависимости от условий эксплуатации и свойств грунта. Такая конструкция обычно состоит из бетонной стены, усиленной арматурой, которая обеспечивает дополнительную прочность и устойчивость. Монолитная армированная бетонная стена обладает высокой несущей способностью и устойчивостью к боковому давлению грунта. Она более надежна по сравнению с другими вариантами стен, такими как блочные или кирпичные конструкции, которые могут быть менее прочными и устойчивыми [74].

Однако при выборе толщины стены подземного сооружения также учитываются другие факторы, такие как расчетные нагрузки, геологические условия, требования строительных норм и стандартов. Проектирование и выбор оптимальной конструкции стены подземного сооружения должны выполняться

соответствующими специалистами с учетом всех этих факторов. Важно отметить, что выбор материалов и конструктивной схемы подземного сооружения должен быть основан на тщательных исследованиях и расчетах, чтобы обеспечить не только прочность и устойчивость, но и долговечность сооружения [75].

Если для строительства стен подземного сооружения применяются блочные изделия, то кладку необходимо усиливать продольным армированием. При использовании сборных бетонных блоков для строительства подземных сооружений, они должны быть изготовлены из бетона класса не ниже В10 [76].

В соответствии с таблицей 1.1 и требованиями строительных норм, минимальная толщина стены подземных частей зданий и сооружений составляет 30 см. Это значение является рекомендацией и должно учитываться при создании расчетных моделей для оценки технической эффективности подземных объектов. Однако, толщина несущих (ограждающих) конструкций будет зависеть от различных факторов. Класс бетона, давление грунта и форма сооружения (круглое, арочное, прямоугольное и т.д.) - все это факторы, которые могут влиять на определение толщины стены. Когда проектируются подземные части здания (сооружения), инженеры и специалисты в области геотехники учитывают эти факторы и проводят расчеты, чтобы определить оптимальную толщину стены для обеспечения требуемой прочности и устойчивости сооружения. Это включает выбор соответствующего класса бетона, учет давления грунта и формы сооружения.

Торкрет-бетонная смесь является эффективным средством усиления подземных сооружений, позволяющим восстановить (а в ряде случаев и улучшить) их несущую способность.

Таким образом, при проектировании подземных сооружений необходимо учитывать рекомендации таблицы 1.1, однако окончательное определение толщины стены должно быть основано на расчетах и нормативах, а также учете всех соответствующих факторов, чтобы обеспечить безопасность и надежность сооружения.

Разные формы сооружений могут требовать различные толщины стены для обеспечения необходимой прочности и устойчивости [78]. Для усиления несущих (ограждающих) конструкций подземных частей и сооружений изнутри могут использоваться различные материалы и технологии, включая применение армированного бетона, стекловолокна, композитных материалов и др. Эти материалы обладают высокой прочностью и могут быть применены для укрепления стен с минимальным увеличением их толщины. Использование таких материалов позволяет увеличить несущую способность стен подземных сооружений, не занимая дополнительного пространства внутри сооружения. Это особенно важно в случае ограниченного пространства или, когда требуется сохранить максимальную внутреннюю площадь и объем сооружения [79]. При проектировании и выборе материалов для усиления несущих конструкций подземных сооружений необходимо учитывать требования строительных норм, особенности конкретного объекта и условий эксплуатации. Расчеты и моделирование должны быть выполнены специалистами с опытом в данной области, чтобы обеспечить безопасность, эффективность и долговечность подземных сооружений.

Таким образом, выявлена необходимость усиления конструкций действующих объектов городской инфраструктуры. При этом, перспективным является использование торкрет-бетонов для приведения этих несущих конструкций в соответствие нормативным требованиям.

1.4. Вопросы применения торкрет-бетонов

Торкрет-бетон находит широкое применение в гражданском строительстве, от ремонта и восстановления до нового строительства, включая горнодобывающую промышленность, строительство туннелей, ремонт конструкций и стабилизацию откосов [80-81]. Его предпочитают в ситуациях, когда обычное бетонирование может оказаться дорогостоящим, трудоемким, опасным или менее эффективным. Как правило, торкретирование можно применять двумя основными методами: методом сухой смеси и методом

влажной смеси (рисунок 1.5). В типичном процессе приготовления сухой смеси, как показано на рисунке 1.5 а, сухие ингредиенты перекачиваются через шланг в высокоскоростном воздушном потоке. В насадку подается вода для создания бетонной смеси, при этом смешивание воды и сухих компонентов происходит как в насадке, так и на приемной поверхности. С другой стороны, процесс влажного смешивания, как показано на рисунке 1.5 б, включает в себя перекачивание предварительно замешанной влажной бетонной смеси через шланг с подачей сжатого воздуха в сопло для ускорения смеси до высокой скорости. Примечательно, что метод торкретирования с использованием влажной смеси имеет тенденцию образовывать меньше пыли и отскока, что делает его более привлекательным вариантом для строительства и ремонта зданий и сооружений [82].

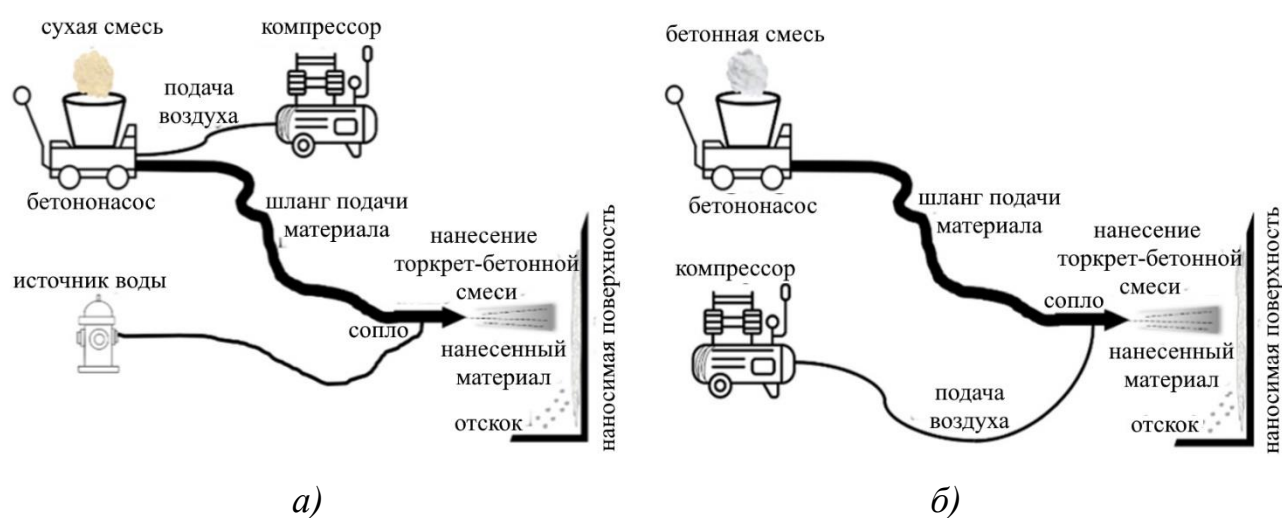


Рисунок 1.5 – Методы торкрет-бетонирования: а) сухой, б) мокрый

Тем не менее, оба метода широко используются в строительной отрасли. Традиционно нанесение торкрет-бетона производилось вручную, под наблюдением опытного специалиста по насадке. В последние годы достижения в строительных технологиях привели к появлению автоматизированных систем торкретирования с использованием роботизированных манипуляторов, как показано на рисунке 1.6 [83]. Кроме того, торкретирование привлекло дополнительное внимание в исследованиях 3D-печати бетона, поскольку в

качестве альтернативного метода печати широко используется метод печати, основанный на экструзии.



а)



б)

Рисунок 1.6 – Автоматизированный процесс торкретирования для:
(*а*) облицовки туннелей [83] и (*б*) 3D-печати методом экструзии [80]

Тем не менее, конструкция из торкрет-бетона часто страдает от проблем с нанесением, таких как отскок и перебетонирование, что может привести к снижению эксплуатационной эффективности, увеличению потерь материалов, снижению качества строительства и потенциальным опасностям на рабочем месте [84].

Отскок относится к явлению, при котором часть заполнителей и цементного теста не может прилипнуть к основанию и отваливается от него, что приводит к значительным потерям материала. Другой часто наблюдаемой проблемой является излишнее перебетонирование, когда нанесенная излишняя торкрет-бетонная смесь затем обрезается до расчетной толщины (что также приводит к перерасходу материала). В частности, при 3D-печати торкрет-бетона достижение точности геометрии является более сложной задачей по сравнению с печатью на основе экструзии (последовательного бетонирования) [85]. Толщина и ширина слоя часто выполняются неточными по сравнению с проектными значениями.

Стоит отметить, что эти проблемы с нанесением неразрывно связаны с характеристиками распыления торкрет-бетона, которые зависят от различных факторов, включая текучесть и вязкость материала, а также геометрию сопла.

Были проведены значительные исследования для понимания укладки торкрет-бетона и факторов, влияющих на него, чтобы эффективно улучшить укладку и уменьшить отскок. Во многих из этих исследований особое внимание уделялось улучшению реологических свойств торкрет-бетона. Сообщалось, что добавление дополнительных вяжущих материалов может улучшить поведение торкрет-бетона [86]. В частности, было обнаружено, что микрокремнезем значительно улучшает процесс торкретирования, он действует как наполнитель в торкрет-бетоне, улучшая когезию и сопротивление расслоению, что приводит к улучшению реологических свойств и меньшему отскоку. [87]. М. Бохач и др. [88] исследовали влияние золы-уноса, метакаолина и измельченного гранулированного доменного шлака на поведение торкрет-бетона и обнаружили, что эти активные полиминеральные добавки приводят к более высокому пределу текучести, хорошей адгезии и, следовательно, к уменьшению отскока. В современной литературе [89-90] также исследовалось влияние добавок на характеристики отскока торкрет-бетона в отношении распределения материала и их эффективности в смягчении отскока. Сообщалось, что включение суперпластификатора приводит к снижению консистенции смеси, что приводит к увеличению отскока. И наоборот, использование ускорителя схватывания эффективно уменьшает отскок благодаря его способности ускорять схватывание материала и быстро повышать когезию. Кроме того, полимерный агент для повышения клейкости может использоваться для усиления связи между торкрет-материалом и основой, что еще больше снижает вероятность отскока. Помимо этого, З. Лю и др. [91] исследовали влияние шероховатости поверхности на поведение отскока. Результаты показали, что увеличение шероховатости поверхности препятствует распространению частиц, что, как следствие, снижает энергию связи и приводит к более высокой тенденции к отскоку. Следует отметить, что эти исследования в основном были сосредоточены на улучшении адгезионных свойств для предотвращения отскока с минимальным учетом кинетики в течение всего процесса отскока.

Таким образом, применение вторичных техногенных ресурсов может привести к улучшению технологических свойств торкрет-бетонной смеси,

однако, при этом необходимо тщательно контролировать изменение физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик.

1.5. Использование техногенных отходов промышленности и строительства при проведении ремонтно-восстановительных работ

Большой пласт научных работ касается использования отходов энергетических предприятий для их утилизации в строительных материалах [92-93]. К.Г. Пугин с соавторами использовали эти техногенные ресурсы для улучшения характеристик грунтов, применяемых для дорожного строительства [94]. Эффективное использование зол в роли наполнителей цементных строительных материалов показано научным коллективом БГТУ им. В.Г. Шухова под руководством В.С. Лесовика и В.В. Строковой [95].

В частности, зола-уноса является широко известной активной полиминеральной добавкой в портландцементы, химический состав которой регламентируется ГОСТами. М. Шакури с соавторами [96] оценивали характеристики раствора, смешанного с термомеханически обогащенной золой-уноса. Д. Ян с соавторами [97] проводили многоаспектное исследование влияния физических и химических свойств 5 типов золы-уноса на удобоукладываемость цементного раствора, смешанного с золой-уноса в больших объемах. Китайские ученые [98] в этом году провели комплексный обзор реологии, физико-механических свойств, микроструктуры и долговечности низкоуглеродистых вяжущих материалов на основе золы-уноса циркулирующего псевдосжиженного слоя.

Эффективное применение отходов теплоэнергетики прослеживается в коллаборации Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого с индийскими коллегами [99]. Другие индийские авторы [100] исследовали физико-механические свойства тяжелого конструкционного бетона с золой-уноса и шлаком. Иранские ученые [101] провели экспериментальное исследование по стабилизации связных грунтов микро- и нанозолой как экологически чистым материалом. Китайские материаловеды [102] получили

сталефибробетон повышенной удобоукладываемости и с высокими эксплуатационными характеристиками, модифицированный золой-уноса и микрокремнеземом. М. Хоссейнзаде с коллегами [103] исследовали упругие свойства бетона с переработанным заполнителем из золы-уноса с анализом результатов многомасштабного моделирования и машинного обучения. Ученые из Бангладеша [104] провели исследование синергетического влияния золы-уноса и джутового волокна на технологические и физико-механические свойства, а также эксплуатационные характеристики бетона.

Н.И. Ватин и Ю.Г. Барабанщиков [105] научно подтвердили возможность использования не только высокоактивных тонкодисперсных зол-уноса, но и менее активных золошлаковых смесей, складированных на протяжении долгого времени на полигонах, в качестве пуццолановых добавок. Г.И. Яковлев и его научная школа эффективно использовали метакаолин для управления структурообразованием бетонов [106]. Ф.Л. Капустин [107] эффективно применял металлургические шлаки для получения вяжущих автоклавного твердения.

Применение традиционных природных наполнителей (опока, трепел и др.) в цементных композитах повышает водопотребность вяжущего, снижает скорость набора его прочности в ранний период твердения и эксплуатационные характеристики. Поэтому, для создания полиминеральных цементных материалов в качестве активного наполнителя большой практический интерес представляет использование добавки пуццолановой группы с особыми свойствами, многотоннажных отходов предприятий теплоэлектроэнергетики – золы-уноса и золошлаковых смесей ТЭС (ЗШС) [108].

Введение золошлаковых материалов уменьшает пористость цементного композита путем заполнения пустот, эффективного блокирования капилляров ультрадисперсными частичками и усиления контактной зоны «цементная матрица - наполнитель», обеспечивая плотную упаковку продуктов гидратации. Эффективность упаковки частиц зависит от их грансостава. Зола-уноса, относящаяся к высокоактивным пуццолановым добавкам, характеризуется значительной скоростью взаимодействия с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, приводя к формированию

вторичных кристаллогидратов, обеспечивая дополнительную прочность. Это и обеспечивает сохранение прочностных свойств композита при снижении цементоемкости [109-110].

Тенденция развития отечественных теплоэлектростанций направлена на их поэтапный перевод на газообразное топливо. В частности, в Приморье на текущий момент аккумулированы многотоннажные отвалы золошлаковых смесей, наносящих огромный вред окружающей среде (таблица 1.2).

Таблица 1.2 - Источники ЗШС на территории Приморья

Источники ЗШС	Запас ЗШС, млн. т.	Площадь земель, отчуждённых под золоотвалы, га	Текущий вид топлива
Артемовская ТЭЦ	18	47	уголь
Партизанская ГРЭС	9	25	уголь
Приморская ГРЭС	50	300	уголь
Владивостокская ТЭЦ-2	25	153	газ
Котельные	0,8	5	уголь

Золошлаковые смеси малоисследованы с точки зрения массового применения в строительстве, поэтому не классифицированы и не стандартизированы. Логичным является классифицировать ЗШС по аналогии с золой-уноса (ГОСТ 25818): кислые, если $\text{CaO} \leq 10$ мас. % и основные если $\text{CaO} > 10$ мас. %.

К настоящему времени в России повторно применяется не более 10% ЗШС (рисунок 1.7).

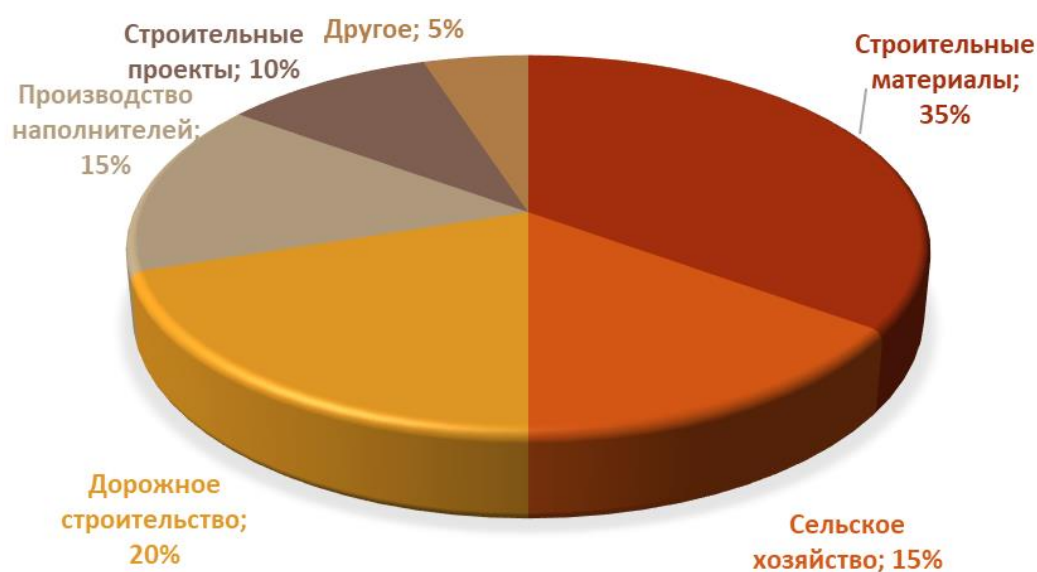


Рисунок 1.7– Сегменты утилизации золошлаковых смесей [110-111]

Потенциал использования мелких активных частиц отходов ТЭЦ доказан рядом ученых [112-113], в частности в качестве наполнителей композиционных вяжущих, повышая эксплуатационные характеристики бетона на его основе. С другой стороны, гидроудаленные золошлаковые отходы имеют неоднородность состава и отличаются потерей активности за счет долгого размещения на открытых площадях [114-118].

Исходя из вышеизложенного, применение ЗШС перспективно для утилизации в качестве пуццолановых добавок в вяжущих, однако требует дополнительного изучения. Рост технической эффективности композиционных вяжущих достигается обогащением золошлаковых смесей [119-121]. В частности, научная школа д.т.н. Г.И. Овчаренко [122] внесла значительный вклад в изучение процессов активизации низкокачественных золошлаков ТЭЦ. Активизация может включать различные приемы обогащения (дезинтеграция, флотация, магнитная сепарация, сушка, механоактивация и т.д.), а также их эффективное сочетание.

Важной проблемой, требующей всестороннего детального исследования, является утилизация отсевов дробления горных пород, которых только в нашей стране 90 млн. м³, занимая большие пространства и нарушая баланс экологических систем [123-124].

Исследованием техногенных отходов в качестве компонентов бетонов (например, вторичное применение бетонного лома) занималась научная школа А.М. Айзенштадта [125]. Бетонный лом (также известный как рециклированный бетон) является важным материалом в современном строительстве. Он обычно используется в следующих целях:

1. *Улучшение грунта* [126-127]: бетонный лом используется для стабилизации почвы, особенно в районах с высоким уровнем грунтовых вод или при наличии слабых грунтов, таких как песок или глина. Лом бетона добавляется в грунт для увеличения его несущей способности и предотвращения оседания.

2. *Заполнение и выравнивание* [128-129]: рециклированный бетон применяется для выравнивания поверхностей и заполнения углублений. Это

позволяет сэкономить на строительных материалах и уменьшить объем земляных работ.

3. *Создание оснований для дорог и парковок [130-131]:* лом бетона часто используется в качестве основания для дорог, парковок и других твердых покрытий. Благодаря своей прочности, он обеспечивает надежную основу для будущих конструкций.

4. *Заполнитель бетонных смесей [132-133]:* бетонный лом измельчается и используется в качестве заполнителя в производстве новых бетонных смесей. Это помогает уменьшить стоимость строительства, так как не требуется приобретать новые материалы.

5. *Строительство временных дорог [134-136]:* лом бетона применяется в качестве материала для временных дорог. Благодаря его прочности и стабильности, такие дороги выдерживают тяжелую технику и служат длительное время.

6. *Активная минеральная добавка в композиционное вяжущее [137-139]:* в затвердевшем бетоне конструктивных элементов зданий и сооружений остается до 10 мас. % непрореагировавших клинкерных минералов, которые после измельчения вносят свой вклад в вяжущие свойства композита.

Таким образом, перспективным представляется применение отходов промышленности (при должной подготовке - золошлаковых смесей, бетонного лома и отсева дробления гранитного щебня) при производстве материалов для ремонта железобетонных сооружений. Налицо важность разработки новых способов обогащения техногенных ресурсов с целью их утилизации в производстве строительных материалов, обладающих заданным набором свойств. 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.

1.6. Выводы

1. Несмотря на огромное количество и разнообразие городских сооружений, они должны обеспечивать эффективную работу при различных экстремальных условиях, как природного, так и техногенного происхождения.

2. Всесторонний анализ трудов отечественных и зарубежных ученых доказывает, что на здания и сооружения городской инфраструктуры действует большое число воздействий, приводя к физическому износу. Поэтому необходимо проводить усиление несущих конструкций этих объектов с применением современных эффективных строительных материалов.

3. Выявлена необходимость усиления конструкций действующих объектов городской инфраструктуры. При этом, перспективным является использование торкрет-бетонов для приведения этих несущих конструкций в соответствие нормативным требованиям.

4. Перспективным представляется применение отходов промышленности (при должной подготовке - золошлаковых смесей, бетонного лома и отсева дробления гранитного щебня) при производстве материалов для ремонта железобетонных сооружений. Налицо важность разработки новых способов обогащения техногенных ресурсов с целью их утилизации в производстве строительных материалов, обладающих заданным набором свойств.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Исходные сырьевые материалы

В качестве основы для композиционного цемента применялся портландцементный клинкер (АО «Спасскцемент») - продукт обжига до гомогенного состояния смеси известняка и глины или некоторых материалов (мергеля, доменного шлака и пр.) (рисунок 2.1 а). В результате обжига в клинкере формируются силикаты кальция.

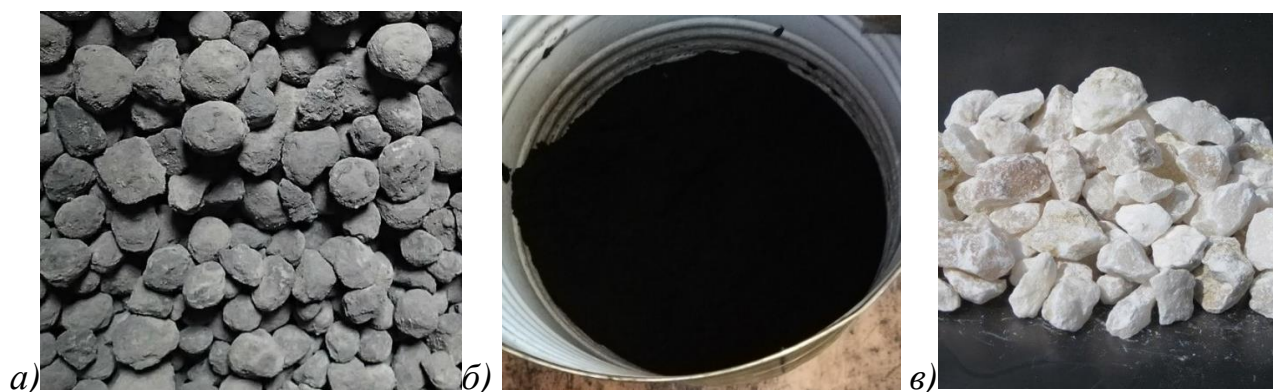


Рисунок 2.1 – Компоненты КЦ: а) портландцементный клинкер, б) алюмосиликатная составляющая, в) двуводный гипс

Фазовый состав портландцементного клинкера (рисунки 2.2-2.3) обычно состоит из кристаллической фазы, которая представлена клинкерными минералами, и аморфной фазы, представленной клинкерным стеклом.

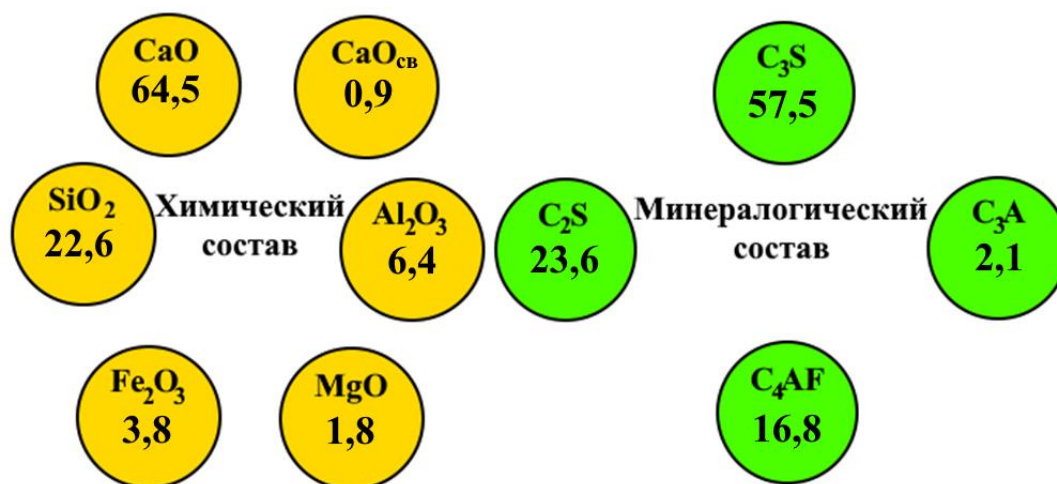


Рисунок 2.2 – Химический и минералогический состав клинкера

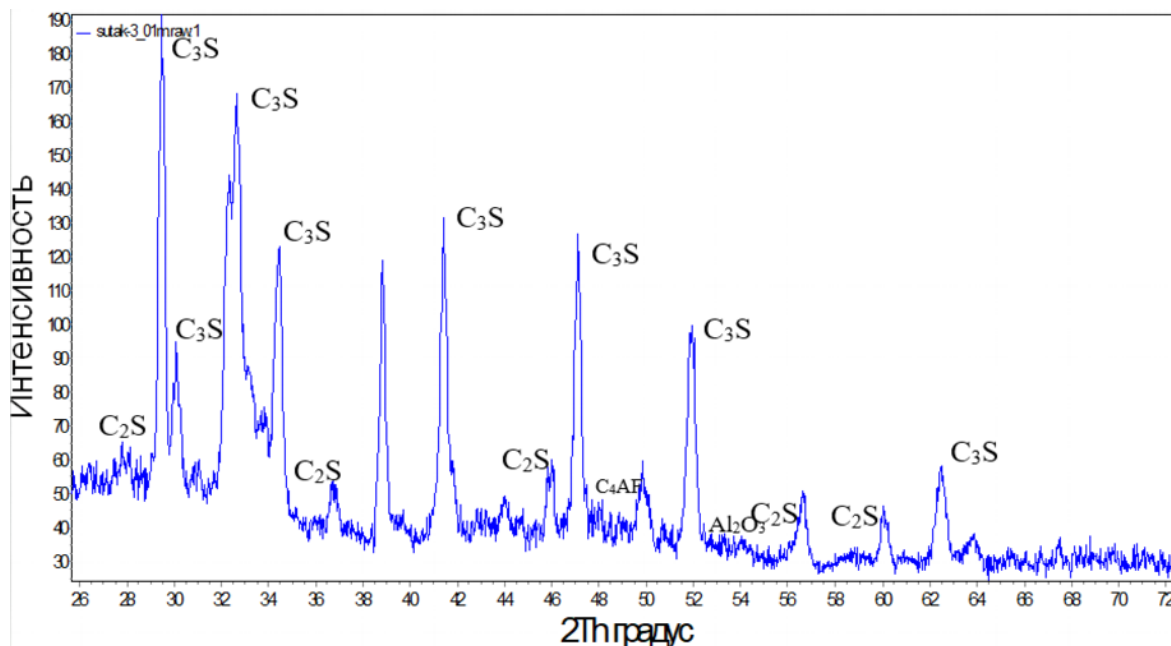


Рисунок 2.3 – Рентгенограмма молотого портландцементного клинкера

Алюмосиликатная составляющая (АСС), полученная из золошлаковых материалов, путем обогащения флотацией и магнитной сепарацией, использована в качестве активного пуццоланового компонента композиционного цемента (рисунок 2.1 б). Представительность пробы объясняется усреднением ее состава (рисунок 2.4). Минеральный состав ЗШС приведен на рисунке 2.5.



Рисунок 2.4 – План исследований ЗШС

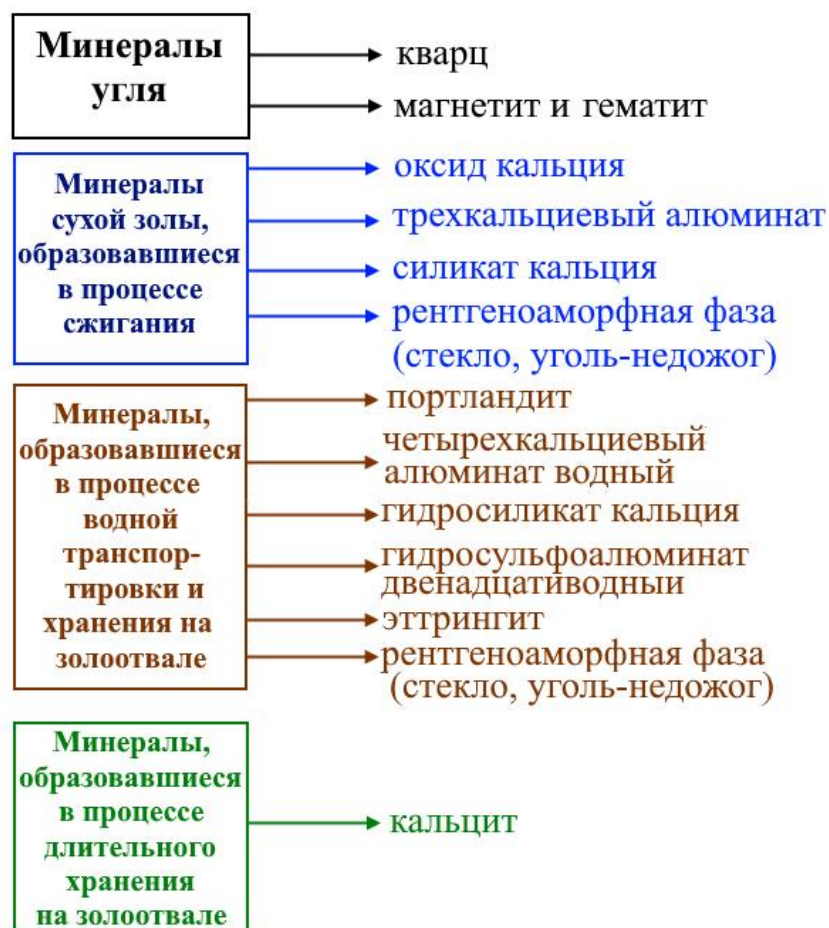


Рисунок 2.5 – Минеральный состав ЗПС

Бетонный лом из эксплуатирующихся сооружений г. Владивостока применялся в лабораторных исследованиях (таблица 2.1). При этом важным практическим результатом диссертации является то, что в каждом конкретном случае усиления железобетонной конструкции торкрет-бетоном применяется бетонный лом из этой конструкции, обеспечивая сродство структур.

Таблица 2.1 - Химический состав бетонного лома

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	SO ₃	прочее
49,6	29,9	9,7	1,8	3,1	1,6	1,6	1,5	1,2

Для регулирования сроков схватывания добавлялся молотый гипсовый камень (двуводный гипс) в количестве 5% от массы клинкера (рисунок 2.1 в).

Для испытания КЦ применялся вольский полифракционный песок (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 - Показатели вольского песка

В качестве мелкого заполнителя использовался полифракционный отсев дробления гранитного щебня (АО «Востокцемент») с модулем крупности 2,7 (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Отсев дробления гранитного щебня

ЗШС и гранитная порода содержат радиоактивные элементы и имеют определенный радиационный фон рисунок 2.8.

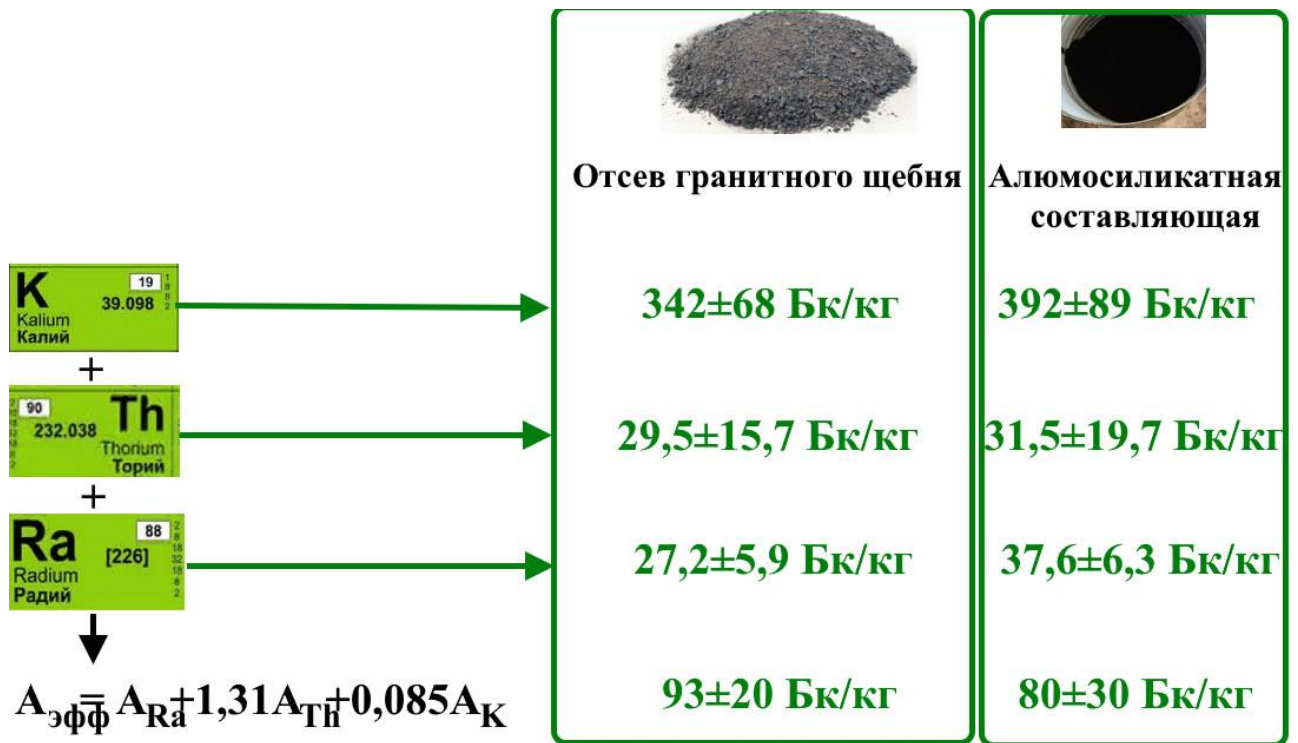


Рисунок 2.8 – Удельная эффективная активность техногенных ресурсов

Выявлено, что представленные источники сырья представляют собой 1-й класс материалов (<370 Бк/кг) по ГОСТ 30108-94 (пригодны для всех строительных работ).

Российский импортозамещенный суперпластификатор «Хидетал ГП9 альфа В» на основе поликарбоксилатных эфиров («ООО СКТ-стандарт», г. Коломна) является химическим модификатором для цементных материалов (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Используемый суперпластификатор

Для ускорения схватывания торкрет-бетонов применялась сухая добавка Реолен МС 451 (ООО «Гидрозо», г. Москва) с плотностью 650 кг/м³ и рН = 2,5. Добавка представляет собой смесь нафталинсульфонатов и органических компонентов, специально подобранных для обеспечения максимально эффективных химических реакций в присутствии алюмосиликатов и бетонного лома.

Положительным аспектом применяемого сырья служит их российское происхождение, а также максимально возможная утилизация промышленных отходов.

2.2. Методы экспериментальных исследований

Сводный перечень исследований, осуществленных в диссертации, приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Сводный перечень исследований

№ п/п	Исследование	Нормативная методика	Размер образца	Изучаемое свойство
1	Лазерная гранулометрия	ГОСТ Р 57923-2017	0,01-1000 мкм	гранулометрический состав
2	Удельная поверхность	ГОСТ 310.2-76, 23789-79, 21043-87	0,5-200 мкм	площадь удельной поверхности
3	Электронная микроскопия	ГОСТ Р 8.631-2007	50×25×8 мм	морфология шлифов
4	Рентгено-флуоресцентный анализ	ГОСТ Р 55410-2013	порошок	химический состав
5	Рентгено-дифракционный анализ	ГОСТ 16865-79	порошок	минералогический и фазовый состав
6	Дифференциально-термический анализ	ГОСТ Р 57931-2017	113 мг	изменение энергии
7	Термогравиметрия	ГОСТ Р 56721-2015	113 мг	изменение массы
8	Спектрометрия	ГОСТ 26864-86	порошок	удельная эффективная активность
9	Активность компонентов вяжущего	Метод Запорожца	2 г	поглощение СаО

10	Эффективность минеральной добавки	ГОСТ 25592-2019	разный	Физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики
11	Калориметрия	ГОСТ Р 57293-2016	100 мл	теплота гидратации
12	Сроки схватывания	ГОСТ 30744-2001	500 г	начало и конец схватывания
13	Подвижность и жёсткость (удобоукладываемость) смеси	ГОСТ Р 57809-2017 ГОСТ 10181-2014 (метод Скрамтаева)	6 л	осадка, расплыв и жесткость конуса
14	Деление массы на объем	ГОСТ 12730.1-2020	70×70×70 мм	средняя плотность
15	Статическое сжатие	ГОСТ 10180-2012	100×100×100 мм	прочность на сжатие
16	Ультразвуковой контроль прочности	ГОСТ 17624-2012	Стена сооружения	прочность на сжатие
17	Отрыв со скалыванием	ГОСТ 22690-2015	Стена сооружения	прочность на сжатие
18	Прочность керна	ГОСТ 28570-2019	Цилиндры Ø100 мм, высотой 100 мм	прочность на сжатие
19	Статический изгиб	ГОСТ 10180-2012	40×40×160 мм	прочность на растяжение при изгибе
20	Вязкость и водоотделение	ГОСТ 10181-2014	1 л.	вязкость и седиментация
21	Водопоглощение	ГОСТ 12730.3-2020	100×100×100 мм	водопоглощение по массе
22	Морозостойкость	ГОСТ 10060	100×100×100 мм	марка по морозостойкости F ₁
23	Водонепроницаемость	ГОСТ 12730.5-2018	Цилиндры Ø150 мм, высотой 30 мм	марка по водонепроницаемости
24	Коррозионная стойкость	ГОСТ Р 56687-2015	25×25×254 мм с реперами.	сульфатная коррозия
25	Ударная выносливость	АСІ Committee 544	600×600×50 мм	коэффициент ударной вязкости
26	Интенсивность напряжений	ГОСТ 29167-2021 RILEM	40×40×160 мм 100×100×100 мм с надрезами	коэффициент интенсивности напряжения
27	Адгезия	ГОСТ 31356-2007	Цилиндры Ø50 мм, толщиной 10 мм	прочность сцепления с основанием
28	t-критерий	ГОСТ 25094-2015	шесть образцов-балочек размерами 40×40×160 мм	активность добавки (по прочности на сжатие)

2.2.1. Исследование микроструктуры материалов

Морфологические особенности микроструктуры изучались на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Tescan MIRA3 (рисунок 2.10), позволяющем осуществлять энергодисперсионную спектроскопию.



Рисунок 2.10 - РЭМ Tescan MIRA3

Рентгенофлуоресцентный и рентгенодифракционный анализ. Для изучения элементного и минерального состава применялся порошковый рентгеновский дифрактометр D8 Advance Bruker AXS (рисунок 2.11) (длина волны $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$).



Рисунок 2.11 - Оборудование D8 Advance

Дериватограф Q-1500D (рисунок 2.12) применялся для **термических исследований** (ДТА, ТГ и ДСК).



Рисунок 2.12 – Дериватограф Q-1500D

Универсальный спектрометрический комплекс УСК «Гамма Плюс» (рисунок 2.13) применялся для исследования **удельной эффективной активности радионуклидов** золошлаковых материалов и отсева гранитного щебня.



Рисунок 2.13 - Спектрометрическое оборудование

Гранулометрия частиц сырьевых материалов оценивалась с применением лазерного анализатора «Анализетте 22» (рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 - Лазерное гранулометрическое оборудование

Удельная поверхность сыпучего сырья исследовалась с применением прибора ПСХ-11 (рисунок 2.15).

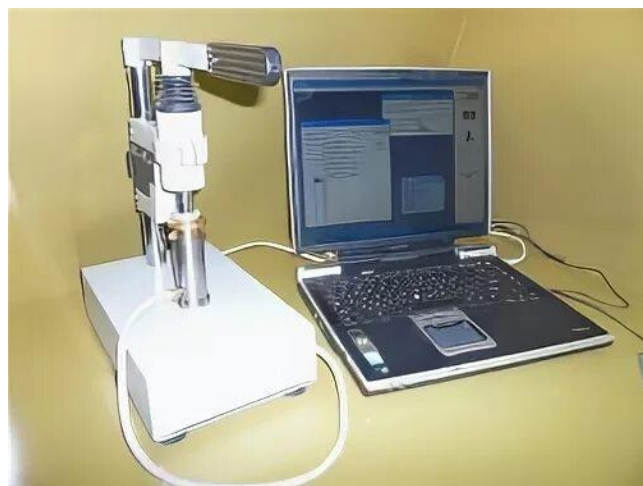


Рисунок 2.15 – Оборудование для определения удельной поверхности сырья

Активность компонентов вяжущего определялась по количеству CaO , поглощенного насыщенным раствором извести. Два грамма АСС добавлялись в 100 мл насыщенного раствора извести. Каждые двое суток проводилось титрование соляной кислотой по 50 мл и высчитывалось количество оксида кальция путем измерения объема раствора реактива точно известной концентрации, расходуемого для реакции с определяемым веществом. Общее количество CaO , поглощенного одним граммом алюмосиликатов, вычислялось на протяжении 30 суток.

Показатель эффективности алюмосиликатной составляющей композиционного цемента определялся по ГОСТ 25592-2019 по процентному изменению свойств смеси бетона.

Теплота гидратации вяжущего исследовалась на дифференциальном квазиизотермическом калориметре ToniCAL 7338. Определенное количество измельченной пробы насыпали в тонкостенный мерный стеклянный сосуд и помещали в измерительную ячейку в сосуде калориметра. Дополнительный сосуд (инъекционный шприц многоразового использования) с порцией жидкости встроен в сосуд для образца. После достижения теплового баланса в измерительной ячейке оба компонента реакции (вяжущее и дистиллированная вода) смешиваются под давлением в течение нескольких секунд. Начинается непрерывная регистрация термонапряжения (мВ) как меры произведенного количества тепла. Все измеренные значения, графики и параметры испытаний хранятся в базе данных и могут быть экспортированы.

2.2.2. Исследование технологических свойств смесей

Удобоукладываемость бетонных смесей определялась с применением стандартного конуса по величине осадки, расплыва и жесткости (по методу Скрамтаева).

Определение **вязкости** осуществлялось путем оценки времени прохождения раствора через вискозиметр Марша.

Водоотделение торкрет-бетонных смесей определялось в процентах через 15, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 230 мин.

2.2.3. Изучение физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик разработанных материалов

Значение **средней плотности** образцов вычислялось делением массы на объем.

Прочность на сжатие определялась по стандартной методике ГОСТ 310.4-81 на кубах с ребром 70 мм (рисунок 2.16).



Рисунок 2.16 – Определение предела прочности образцов при сжатии

Прочность на растяжение при изгибе определялась трехточечным методом на образцах призматической формы 40×40×160 мм на прессе SHIMADZU (рисунок 2.17).

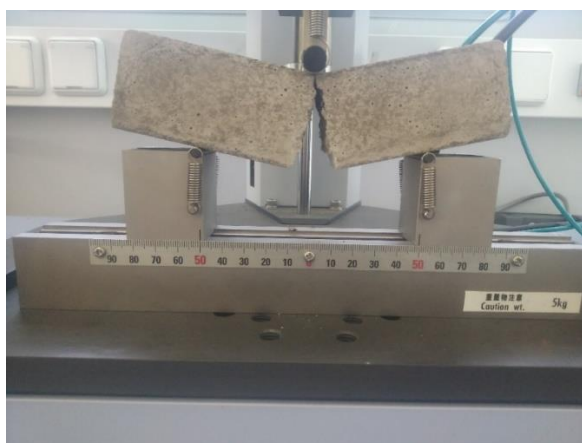


Рисунок 2.17 – Испытания трехточечного изгиба

Модуль упругости высчитывался по формуле

$$E_{\sigma} = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_{1y}} \quad (2.1)$$

где σ_1 - приращение напряжения вплоть до 30%-ного значения от разрушающей нагрузки, а ε_{1y} – соответствующий прирост деформации.

Морозостойкость разработанных материалов исследовалась по первому базовому методу F_1 на бетонных кубах с ребром 10 см, насыщенных водой.

Водонепроницаемость. Применялись цилиндрические образцы диаметром 150 мм и высотой 30 мм по методу мокрого пятна при поэтапном приложении давления.

Стойкость к сульфатной коррозии исследовалась в 5% растворе Na_2SO_4 в течение 12 месяцев.

Ударная выносливость. Испытание на ударную выносливость осуществлялось на панелях с квадратным основанием со стороной 60 см и толщиной 5 см в возрасте 28 суток с применением многократно падающего с интервалом 5 сек в центр плиты с высоты 0,6 м ударника массой 10 кг с наконечником в виде стального шара диаметром 4 см (рисунок 2.18) (методика АСІ Committee 544). Ударная энергия $E_{уд}$ (Дж) рассчитывалась по формуле

$$E_{уд} = m \cdot g \cdot h \cdot N \quad (2.2)$$

где m - масса ударника; g - ускорение свободного падения; N –количество ударов.



Рисунок 2.18 – Определение ударной выносливости

Адекватным показателем, описывающим ударную выносливость, является коэффициент ударной вязкости μ , характеризующий собой отношение числа ударов до разрушения N_f к числу ударов до начала трещинообразования N_c .

Адгезия оценивалась по силе отрыва затвердевшего образца бетона от бетонного основания.

2.2.4. Исследование свойств торкрет-бетонов на различных строительных объектах

Диссертантом разработана и запатентована (свидетельства о гос. регистрации программ для ЭВМ 201966517 и 202161665) методика комплексной оценки технического состояния подземных сооружений, которая необходима при принятии решения о проведении ремонта для доведения до нормативных требований возможности функционирования объектов в качестве защитных.

Автор обобщил информацию о создании сети защитных объектов в городской черте и установил следующие принципы этапности (рисунок 2.19).

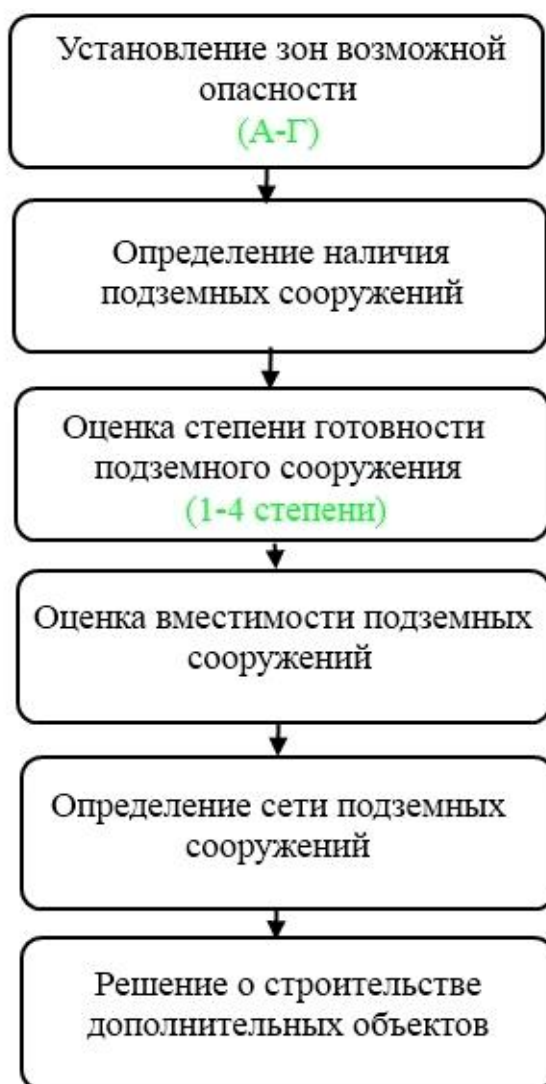


Рисунок 2.19 – Этапы методики подготовки объектов

На первом этапе производится оценка зон потенциальной опасности (рисунок 2.19).



Рисунок 2.20 – Зонирование потенциальной опасности в городе

На втором этапе производится учет и оценка действующих защитных объектов ГО и сооружений двойного назначения, учитывая радиус сбора и их техническое состояние.

На третьем этапе производится оценка готовности защитного объекта по предложенной диссертантом шкале:

- 1 степень – объект готов;
- 2 степень – требуется совершенствование вентиляции, герметизация дверей, закладка продовольствия, медикаментов и горюче-смазочных материалов и др. малозатратные мероприятия;
- 3 степень – необходимо закрепление грунтов;
- 4 степень - требуется укрепление несущих элементов.

На четвертом этапе оценивается вместимость защитных объектов с учетом объемно-планировочных решений, производительности вентиляционной системы и т.д.

На пятом этапе все выявленные и оцененные защитные объекты наносятся на план города и анализируется возможность эффективного функционирования образованной сети.

На шестом этапе вырабатываются планы строительства недостающих защитных объектов.

С учетом данных этапов на рисунке 2.21 обобщена методика подготовки объектов двойного назначения.

По разработанной методике автором произведено натурное обследование прочностных свойств объектов двойного назначения г. Владивостока взаимодополняющими неразрушающими методами с использованием прибора для измерения скорости ультразвука, кернов и отрыва со скалыванием (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Степень износа подземных сооружений г. Владивостока

Объект	Год постройки	Год капитального ремонта	Несущая способность, на действие боковой волны, кПа	Степень износа, %
Пешеходный переход (ул. Светланская-ул. Алеутская)	1989	2011	90	10
Пешеходный переход (ул. Светланская)	1988	2011	80	20
Пешеходный переход (пр-т 100 лет Владивостоку)	1990	2012	70	30
Пешеходный переход (ост. Молодежная)	2003	-	80	20
Пешеходный переход (ул. Жигура)	1992	-	90	10
Пешеходный переход (ул. Гоголя)	1993	-	70	30
Пешеходный переход (ост. Картинная галерея)	1994	-	90	10

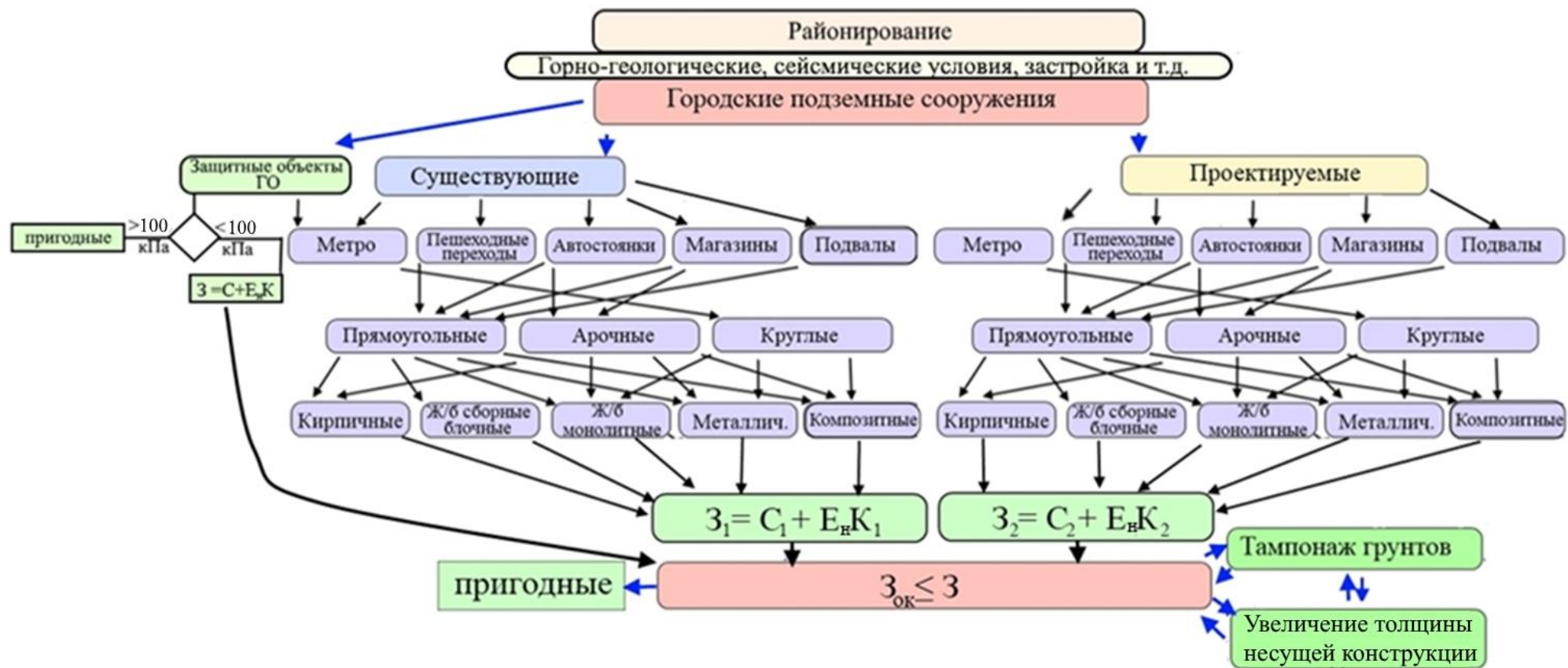


Рисунок 2.21 – Методика подготовки объектов двойного назначения

Таким образом, в результате натурных обследований по разработанной методике установлена высокая степень износа конструкций городских подземных сооружений (до 30% на примере г. Владивостока). Поэтому необходим ремонт подземных сооружений с применением инновационных строительных материалов.

Автором проведено натурное обследование железобетонных объектов г. Владивостока неразрушающими взаимодополняющими методами:

1. С использованием прибора для измерения скорости ультразвука «Пульсар 2.2» (рисунок 2.22).



Рисунок 2.22 – Прибор для измерения скорости ультразвука «Пульсар 2.2»

2. Методом отрыва со скалыванием по ГОСТ 22690-2015 (рисунок 2.23).



Рисунок 2.23 – Испытание бетона отрывом со скалыванием

3. Исследованием цилиндрического керна диаметром и высотой 100 мм, выбуренного алмазным буром (рисунок 2.24) по ГОСТ 28570-2019.



Рисунок 2.24 – Цилиндрические керны диаметром и высотой 100 мм, выбуренные алмазным буром

2.3. Математическое планирование экспериментов

Математическое планирование осуществлялось для проведения полных факторных экспериментов согласно РДМУ 109-77 с применением программного комплекса «Develve». Современные подходы к выборке и определению необходимого количества образцов и испытаний стремятся к максимальной точности и надежности результатов, учитывая ограничения времени, ресурсов и стоимости исследования, как свидетельствует недавняя статья В.И. Логаниной и М.В. Зайцевой [140].

При этом осуществлялось планирование получения рациональных составов композиционного цемента (таблица 2.4), а также торкрет-бетонов на его основе (таблица 2.5). Контролируемым параметром, на основании оценки которого принималось решение о технической эффективности композиционного цемента, являлась прочность на сжатие.

Таблица 2.4 – Журнал планирования получения рациональных составов композиционного цемента

Контролируемые переменные (содержание компонентов в % от массы вяжущего)	Клинкер	АСС	СП
Верхний уровень	100	65	1,5
Нижний уровень	35	0	0
Средние уровни	45, 55, 65, 75, 85	15, 25, 35, 45, 55	0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25
Интервал варьирования	10	10	0,25

Таблица 2.5 – Журнал планирования получения рациональных составов торкрет-бетона

Контролируемые переменные	Содержание алюмосиликатной составляющей в % от массы КЦ	Водовязущее отношение
Верхний уровень	35	0,4
Нижний уровень	0	0,3
Средние уровни	15, 25	0,35
Интервал варьирования	10	0,05

Контролируемыми параметрами, на основании оценки которых принималось решение о технической эффективности торкрет-бетонов, являлись осадка и распыл конуса, плотность смеси и бетона в возрасте 28 суток, прочность на сжатие и на растяжение при изгибе в возрасте 2, 7 и 28 суток (а также отношения между ними), число ударных воздействий до начала трещинообразования и до потери структурной целостности образца (а также удельная энергия трещинообразования для всех вариантов), коэффициент ударной вязкости, водопоглощение по массе, морозостойкость, водонепроницаемость и адгезия.

Дисперсионный анализ ANOVA применялся для поиска оптимальных моделей (линейных, квадратичных и двухфакторных) и оценки их адекватности, определяемой через коэффициент R^2 . При этом погрешность для всех экспериментов составляла не более 5%. Дисперсионный анализ является более простым и адекватным, чем t-критерий Стьюдента.

2.4. Выводы

1. Положительным аспектом применяемого сырья служит их российское происхождение, а также максимально возможная утилизация промышленных отходов.

2. Методология диссертации, основанная на принципах системного изучения структуры и свойств цементных композитов, подразумевает комплексный анализ и исследование различных аспектов материала. 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, используя при этом физико-химические методы анализа, лазерную гранулометрию, рентгенофазовый и дифференциально-термический анализ, растровую электронную микроскопию и т.д. Эксплуатационные характеристики изучались, как в лабораторных, так и в натуральных условиях с применением инструментальной базы Дальневосточного федерального университета.

3. РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ ЦЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

3.1. Обогащение золошлаковых смесей с выделением их алюмосиликатной составляющей

Постоянно возрастающие требования к строительным материалам требуют поиска и расширения номенклатуры новых видов сырья. Ценность подобных сырьевых ресурсов повышается, если попутно происходит утилизация различных отходов. Примером таких обогащенных материалов являются алюмосиликаты, получаемые из гидроудаленных ЗШС. Обогащение золошлаковых смесей осуществлялось по разработанной диссертантом технологической схеме.

В промышленных масштабах обогащение золошлаковых смесей является недостаточно эффективным, показывая степень очистки не более 50% (при том, что в лабораторных условиях удается добиться 90%). Это связано, в том числе, и с тем, что оборудование и технологические параметры, применяемые для обогащения ЗШС, заимствованы из процессов обогащения горных пород.

Поэтому диссертантом усовершенствованы флотационная установка и магнитный сепаратор, а также технологические параметры обогащения золошлаковых смесей (патент РФ №2806396 от 31.10.2023 г.).

В ходе предварительной подготовки отобранное с золоотвала сырье подвергается дезинтеграции с классификацией по фракциям более и менее 0,16 мм. Крупные частицы направляются обратно в золоотвал, а мелкая фракция поступает во флотационную установку, где удаляются частицы недожженного угля при интенсивности перемешивания 1700 об/мин в течение 7 минут (рисунок 3.1). При этом флотационная установка модернизирована: она разделена на 3 камеры, в каждой из которых свой режим аэрации и свои реагенты (в первой камере керосин, а в остальных - высокомолекулярные полимеры, представляющие собой технические продукты нефтехимии «Дэман» и «Флучан»

(рисунок 3.2)). Технические продукты нефтехимии легче воды, поэтому они обволакивают фракции углерода, поднимая их на поверхность воды. Более тяжелые фракции алюмосиликатов оседают на дне и не подвергаются обволакиванию реагентами, и, поэтому не изменяют их свойства. В процессе флотации производится непрерывное удаление осадка. Извлеченные недожженные компоненты поступают на изготовление топливных брикетов.



Рисунок 3.1 – Флотация золошлаковой смеси

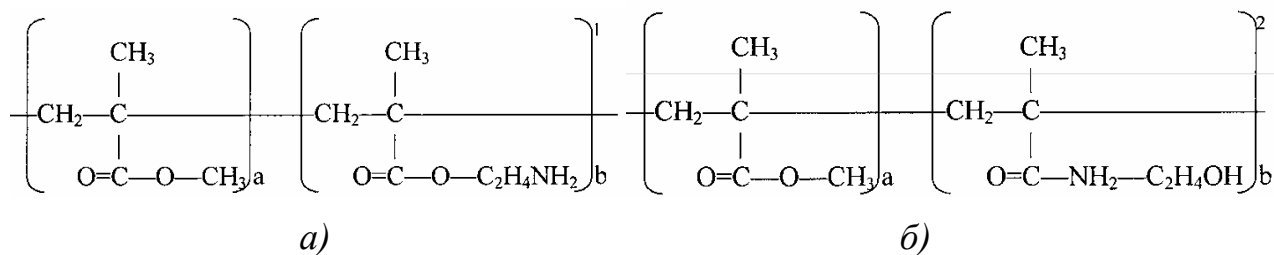


Рисунок 3.2 – Структурные формулы реагентов-модификаторов в растворе диметилформамида: а) «Дэман», б) «Флучан»; а = 30–70%, б = 70–30%

Далее магнитный сепаратор ПБМ-П-25-10 воздействует на золошлаковую смесь магнитной индукцией 0,5 Тл в противоточном режиме в течение 5 мин, попутно удаляя вместе с железосодержащими частицами разные инородные примеси (рисунок 3.3). Оставшиеся компоненты, насыщенные алюмосиликатными оксидами, обезвоживаются и высушиваются в муфельной печи при 250°C в течение 50 мин.

Таблица 3.1 характеризует оксидный состав полученных алюмосиликатов. Согласно требованиям ГОСТ 25818 – 91, полученные алюмосиликаты являются основными, потому что содержат оксид кальция более 10% по массе.



Рисунок 3.3 – Магнитная сепарация ЗПС

Таблица 3.1 – 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
ЗПС	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	-

Рисунок 3.4 характеризует место полученных алюмосиликатов в триаде оксидов кальция, кремния и алюминия.

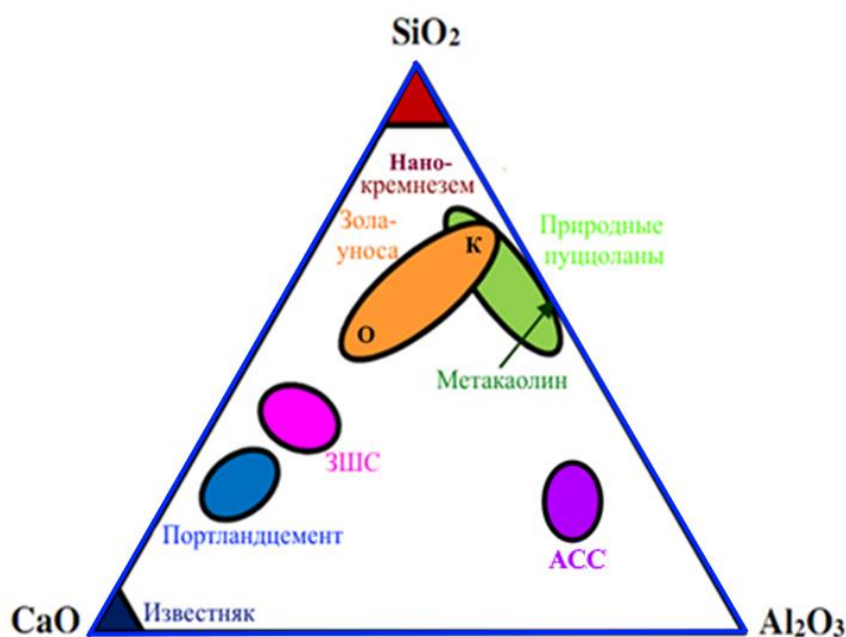


Рисунок 3.4 – Место полученных алюмосиликатов в триаде оксидов кальция, кремния и алюминия

Согласно рентгенограмме (рисунок 3.5), АСС является 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.

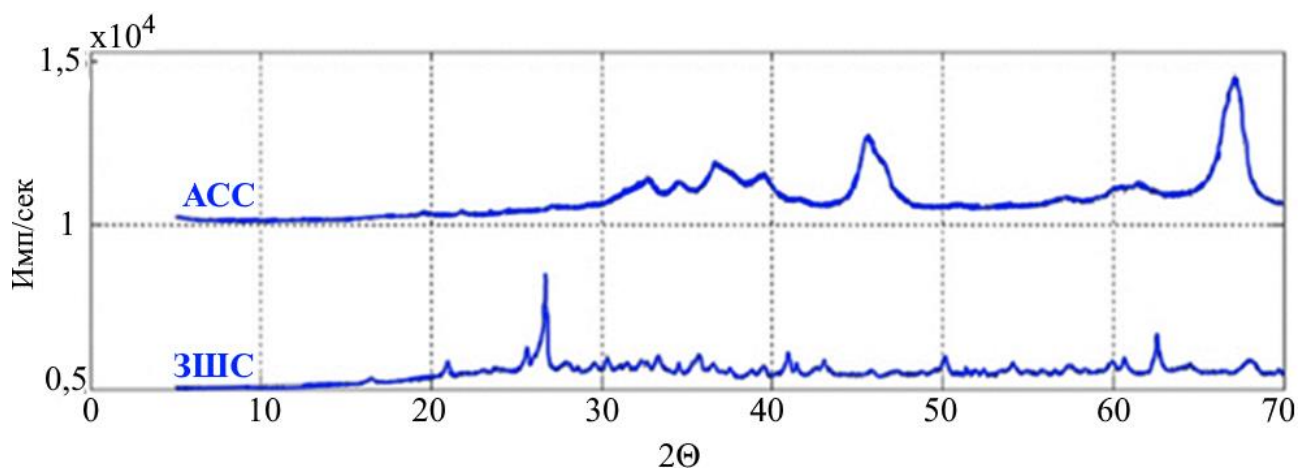


Рисунок 3.5 – Повышение аморфности алюмосиликатной составляющей

Высокая активность полученного алюмосиликатного сырья подтверждается методом Запорожца (рисунок 3.6). Отмечается закономерный рост активности алюмосиликатной составляющей с повышением дисперсности материала.



Рисунок 3.6 – Активность алюмосиликатной составляющей

В соответствии с ГОСТ 25094-2015 добавка является активной (t -критерий равен 15,5).

Таким образом, разработанная алюмосиликатная составляющая характеризуется таким гранулометрическим, химическим и минеральным составом, который перспективен для использования в роли полиминеральной добавки в композиционном цементе.

3.2. Проектирование состава и изучение свойств композиционного цемента с использованием обогащенных золошлаковых смесей

3.2.1. Проектирование состава и изучение свойств композиционного цемента

Проектирование состава композиционного цемента осуществлялось с учетом анализа современной литературы и с использованием аппарата математического планирования экспериментов (таблица 3.2). Клинкер, АСС и двухводный гипс совместно измельчались до достижения удельной поверхности около 450 м²/кг. Варьированием дозировки суперпластификатора (0,25-1,5 мас. %), который добавлялся к измельченному композиционному вяжущему, осуществлялось поддержание равных заданных значений водовяжущего отношения и равноподвижности при росте содержания водопотребной АСС. В качестве контроля выступал домолотый совместно с гипсом до ≈300 (Ц1) и 450 (Ц2) м²/кг портландцементный клинкер. К рациональному составу КЦ-35 отдельно добавлено 15 мас. % бетонного лома (КЦ-35 Б). Отмечается незначительное повышение активности, однако основной эффект планируется достичь при применении фрагментов бетонного лома ремонтируемых конструкций за счет реализации положений закона сродства структур.

Согласно таблице 3.3, рост прочности на сжатие отмечается при замещении портландцементного клинкера алюмосиликатной составляющей на

уровне 35 мас. %. Дальнейший рост содержания АСС до 65 мас. % приводит к постепенному снижению прочностных свойств.

Таблица 3.3 – 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		15	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

Рост активности композиционного цемента достигался совместной механохимической активацией его компонентов (смеси из 65% клинкера и 35% АСС) в вибрационной мельнице ИВ-4 (рисунок 3.7) в течение 40 минут до достижения заданной удельной поверхности.



Рисунок 3.7 – Технические характеристики вибрационной мельницы

Применение вибрационной мельницы позволило в несколько раз увеличить удельную поверхность по сравнению с удельной поверхностью исходных компонентов композиционного цемента. Это достигается в результате совместного действия ударных и истирающих усилий, причем истирающие усилия оказываются более значительными, чем ударные, что минимизирует энергию активации, позволяя даже через 10 минут измельчения получить 42% частиц размером менее 25 мкм и 39% зерен с размерами от 25 до 50 мкм (рисунок 3.8).

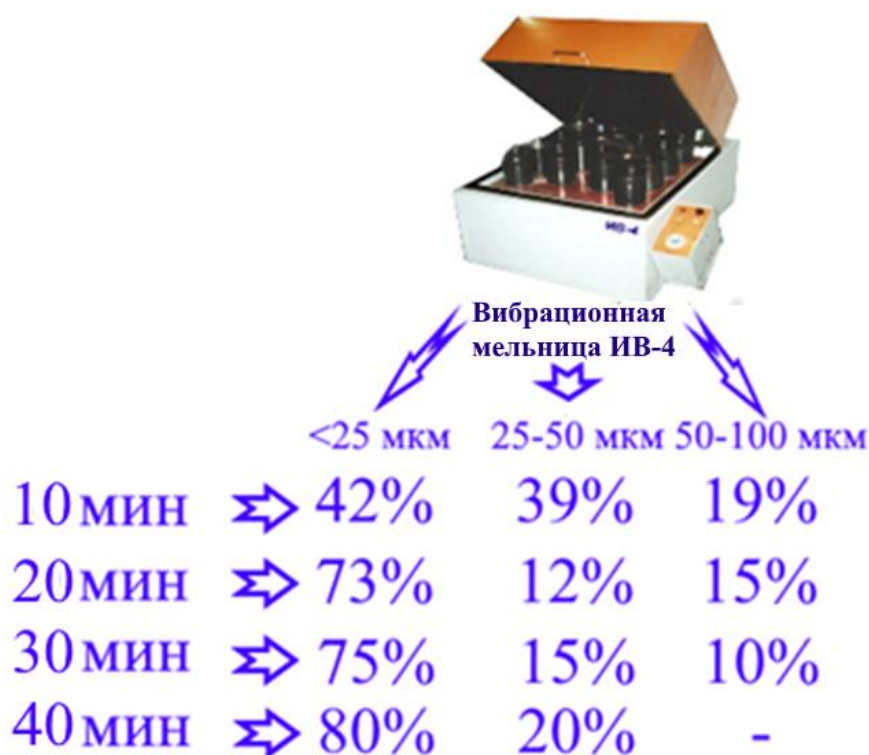


Рисунок 3.8 – Зависимость granulometрии частиц от длительности помола

Механохимическая активация компонентов композиционного цемента приводит к разрушению кристаллической решетки, освобождая накопленную в ней внутреннюю энергию и приводя к росту аморфизации их поверхности.

Химическая реакция гидратации клинкерных минералов, таких как алит и трехкальциевый алюминат, является ключевым процессом при твердении композиционного цемента. Тепловыделение начинается сразу после смешивания цемента с водой, достигая своего максимума в течение первых трех суток. На интенсивность тепловыделения цемента влияет его минеральный состав и

удельная поверхность. Композиционные цементы, содержащие C_3S и C_3A в большом количестве, обычно обладают более повышенным тепловыделением. Это связано с более активной реакцией гидратации данных минералов с водой. Важно отметить, что высокий уровень тепловыделения имеет влияние на процессы твердения и раннюю прочность цементного материала. Контроль тепловыделения и его распределения во время гидратации цемента важен для обеспечения безопасности и качества строительных конструкций. Это особенно важно при использовании больших объемов цемента или в условиях с высокими температурами или ограниченной теплоотводной способностью конструкции.

На рисунке 3.9 представлены кривые изменения тепловыделения портландцементного клинкера ($S_{уд}=450 \text{ м}^2/\text{кг}$), а также композиционных цементов КЦ-35 Б и КЦ-65 с той же удельной поверхностью.

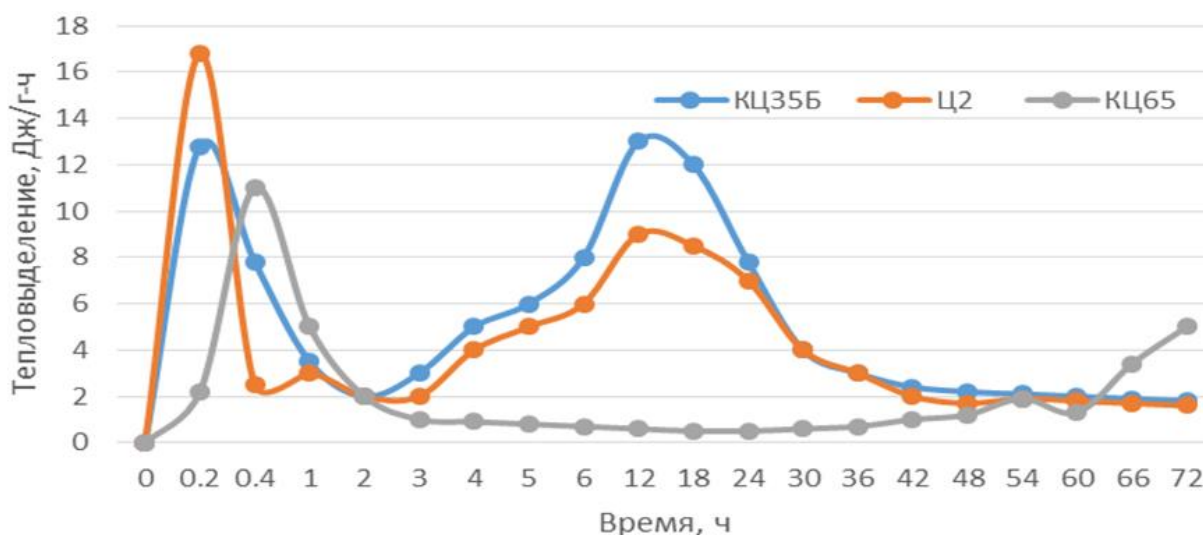


Рисунок 3.9 – Кинетика тепловыделения вяжущих

После затворения портландцементного клинкера взаимодействие его частиц с водой начинается немедленно, и это взаимодействие происходит очень энергично. Это отражается на кривой тепловыделения, где первый пик соответствует первой стадии гидратации, продолжающейся в течение первых 24 минут. На начальной стадии гидратации цемента происходит быстрая реакция гидратации поверхностных частиц минералов клинкера. Гидратация протекает на поверхности частиц и приводит к образованию тонкой пленки

гидратированных соединений [65]. Эта пленка из гелей гидратированных соединений служит барьером для доступа молекул воды к негидратированной поверхности частиц и выходу продуктов гидратации в межзерновое пространство. Это приводит к затруднению химической реакции и накоплению продуктов гидратации вблизи поверхности частиц [66]. Это приводит к значительному тепловыделению в первый час гидратации (16,8 Дж/г·ч). Этот процесс тепловыделения в начале гидратации цемента является важным аспектом, который должен учитываться при проектировании и строительстве, особенно при массовом использовании цементных композиций, что значительно влияет на физико-механические свойства материала, а также на его долговечность и эксплуатационные характеристики.

Согласно [141], увеличение дисперсности вяжущего материала приводит к ускорению тепловыделения при его гидратации за счет увеличения поверхности контакта с водой и, следовательно, интенсификации реакций гидратации. Важно отметить, что общее количество выделенного тепла не зависит от тонкости помола, а определяется количеством гидратированных минералов в цементе. Это полезно для оценки скорости гидратации и контроля процесса твердения цемента. Площадь под графиком представляет собой интегральное значение тепловыделения и используется для сравнения разных образцов или условий гидратации.

На втором этапе гидратации портландцементного клинкера (продолжающемся до 4 часов от начала реакции) процесс замедляется и начинается индукционный период. В это время механизм гидратации изменяется, и мгновенная поверхностная реакция, ограниченная скоростью химической реакции воды с клинкерными минералами, сменяется гетерогенно-диффузионной стадией массообмена через сформировавшиеся слои продуктов гидратации на частицах. На протяжении индукционного периода формируются и медленно растут кристаллы гидратированного силиката кальция, гидроалюминаты кальция и гидроксид кальция. Когда эти кристаллы достигают определенного размера, поверхностное натяжение оболочки уменьшается до

минимума, и она разрушается, обеспечивая доступ воды к непрогидратировавшим частицам. С этого момента начинается третья условная стадия процесса (продолжающаяся до 12 часов от начала реакции) – ускоренная стадия гидратации.

На ускоренной стадии гидратации скорость взаимодействия лимитируется исключительно скоростью химической реакции между водой и клинкерными минералами. На этой стадии гидратации новообразования, такие как гидраты силикатов кальция, гидроалюминаты кальция и гидроксид кальция, поглощаются быстро растущими кристаллами, и не успевают формировать новые оболочки на поверхности непрогидратировавших частиц, создавая условия для интенсивного взаимодействия в системе и образования монолитного каркаса. По мере массового образования кристаллогидратов, на поверхности непрогидратировавших зерен формируется и со временем укрепляется оболочка, благодаря присутствию продуктов гидратации и их взаимодействию с частицами. Повышение плотности оболочки со временем снижает скорость реакций, поскольку доступ воды к непрогидратировавшим поверхностям частиц затрудняется. Формирование монолитного каркаса и уплотнение оболочек на поверхности негидратированных частиц является важным в процессе гидратации клинкерных вяжущих, что способствует образованию прочной структуры и созданию связей между частицами, приводя в конечном итоге к формированию монолитного материала с заданными свойствами прочности и устойчивости.

Тепловыделение КЦ-35Б, состоящего из совместно измельченных до 450 м²/кг клинкера, двуводного гипса, АСС (35 мас. %) и бетонного лома показывает отличия в его поведении по сравнению с обычным бездобавочным молотым клинкером. В данном случае, если в цементном тесте максимальное тепловыделение на первой стадии для клинкера наблюдается в течение 24 минут, а тепловыделение в течение первого часа гидратации составляет 16,8 Дж/г·ч, то для композиционного цемента КЦ-35Б наибольшее тепловыделение к этому времени составляет 12,8 Дж/г·ч, со снижением на одну треть, что может быть

объяснено заменой такого же количества клинкера на алюмосиликатную составляющую. Добавление гипса и алюмосиликатной составляющей способствует активации гидратации и повышению скорости реакций. Гипс служит регулятором скорости гидратации и способствует более быстрой реакции. Кроме того, совместное измельчение компонентов до $450 \text{ м}^2/\text{кг}$ увеличивает доступность поверхности для реакций и также ускоряет гидратацию, что и приводит к более интенсивному тепловыделению.

Вторая стадия гидратационных процессов композиционного цемента аналогична второй стадии гидратации портландцементного клинкера, однако отмечается, что индукционный период для КЦ-35Б протекает при увеличенном на 18% тепловыделении, что объясняется активной химической реакцией в системе с присутствием алюмосиликатной составляющей. Во время индукционного периода, на частицах АСС, равномерно распределенных по всему материалу, происходят процессы кристаллизации и устойчивого роста кристаллов гидросиликатов кальция. Эти процессы происходят благодаря встречной диффузии ионов в объеме пленок-оболочек, что способствует образованию прочной микроструктуры и созданию связей между частицами, что в конечном итоге приводит к формированию монолитного материала с заданными свойствами прочности и устойчивости.

Из-за высокой дисперсности системы отмечается лучшее проникновение воды к непрогидратировавшей поверхности минеральных частиц. Это происходит вследствие снижения поверхностного натяжения тонких пленок до минимального значения. Это обеспечивает лучший доступ воды к непрогидратировавшей поверхности минеральных частиц и способствует ускоренной гидратации. В третьей условной ускоренной фазе процесса гидратации композиционного цемента наблюдается максимальное тепловыделение. На минеральных частицах алюмосиликатного состава образуется тонкая пленка этtringита, препятствующая проникновению воды, однако наличие насыщенной щелочной среды гидроксида кальция и прочих соединений в гелях формирует условия для диффузии воды из межчастичного

пространства с малоцентрированным раствором. Как результат, происходит разрушение защитных слоев и происходит интенсивная химическая реакция гидратации клинкерных составляющих, в основном трехкальциевого алюмината. Этот процесс вызывает внезапное выделение тепла после 3-х часовой гидратации. Образующийся на минеральных частицах эттрингит выполняет роль защитного слоя, препятствующего проникновению воды и замедляющего реакцию гидратации. Тем не менее, под действием насыщенного раствора $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и других веществ, он растворяется, способствуя ускорению реакции гидратации. Это приводит к внезапному выделению тепла и дальнейшему прогрессу гидратации композиционного цемента.

Затем, в ходе достижения максимальной концентрации положительно заряженных ионов кальция и отрицательно заряженных гидроксильных групп, гидратационный процесс также ускоряется по всему объему смеси. И даже несмотря на дальнейшее замедление выделения тепла, гидратация клинкерных минералов продолжает происходить. Данная фаза гидратационного химического процесса характеризуется образованием небольшого количества продуктов гидратации алита и трехкальциевого алюмината. В отличие от молотого клинкера, композиционный цемент КЦ-35Б на заключительном этапе (в возрасте 12 часов) характеризуется усиленным выделением тепла (на 36%). В возрасте 16 часов также отмечен пик тепловыделения, который, вероятно, связан с гидратацией алюмосиликатных минералов. Это повышенное тепловыделение на последних стадиях гидратации композиционного цемента обусловлено различными факторами, такими как повышенная активность алюмосиликатной составляющей, образование структурных изменений и реорганизация гидратационных продуктов. Эти процессы могут влиять на скорость и интенсивность гидратации и, соответственно, на тепловыделение.

На четвертом этапе гидратации композиционного цемента (до 3 суток) осуществляется последующая активизация гидратационного химического процесса и повышение степени гидратации алита, белита, трехкальциевого алюмината и четырехкальциевого алюмоферрита. Это осуществляется в

результате протекания пуццолановой реакции, которая является дополнительным механизмом гидратации композиционного цемента и связывает блокирующий $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в низкоосновные CSH. В этот период отмечается стабильное повышенное тепловыделение в композиционном цементе, которое выше, чем в молотом клинкере на 18%. Это подтверждает повышение гидратационной активности процессов гидратации в твердеющей матрице. Данные результаты подтверждаются данными РФА и изучением физико-механических свойств образцов.

Тепловыделение КЦ, состоящего из совместно измельченных до $450 \text{ м}^2/\text{кг}$ клинкера, двухводного гипса и АСС (65 мас. %) показывает отличия в его поведении по сравнению, как с обычным бездобавочным молотым клинкером, так и вяжущей композицией КЦ-35Б с меньшим содержанием алюмосиликатов. В данном случае, максимальное тепловыделение в первый час гидратации для композиционного цемента КЦ-35Б составляет $12,9 \text{ Дж/г}\cdot\text{ч}$. Это значение меньше, чем тепловыделение для клинкера ($16,8 \text{ Дж/г}\cdot\text{ч}$), что связано с различиями в составе и свойствах этих материалов. Для КЦ-65 это значение снижается до $11 \text{ Дж/г}\cdot\text{ч}$, что на 14% ниже, чем для КЦ-35Б и на 46% ниже, чем для тонкомолотого портландцементного клинкера.

Смещение и снижение первого пика выделения тепла у композиционного цемента КЦ-65 можно объяснить несколькими факторами. Во-первых, малое содержание клинкера в составе цемента приводит к снижению интенсивности гидратации и, следовательно, к меньшему тепловыделению. Во-вторых, присутствие частиц АСС в композиционном цементе блокирует и термоизолирует систему, что приводит к снижению тепловыделения. Эти частицы замедляют процессы гидратации и взаимодействия в системе. Кроме того, введение химического пластифицирующего модификатора «Хидетал» обеспечивает покрытие частиц минералов клинкера и замедление физико-химических процессов диссоциации и взаимодействия в системе. Это затормаживает последующую гидратацию и, как результат, приводит к снижению интенсивности и полноты тепловыделения. Полученные результаты

согласуются с научными работами [144-145], подтверждающими, что суперпластификаторы снижают интенсивность и полноту тепловыделения за счет блокирования и торможения ранних стадий гидратации. Вместе с тем, влияние суперпластификаторов на композиционные цементы, содержащие клинкерные материалы и различные минеральные наполнители, требует дальнейшего исследования.

Если полиминеральные наполнители являются малоактивными и их гранулометрия схожа с портландцементным клинкером, то введение поверхностно-активных веществ в состав композиционного цемента может иметь более выраженный результат, чем при их введении в составы бездобавочного цемента. Это связано с тем, что полиминеральные наполнители не взаимодействуют с водой так активно, как клинкерные минералы, и, следовательно, не участвуют столь интенсивно в реакции гидратации. В результате, на начальном этапе гидратации, полиминеральные наполнители «разбавляют» реагирующую систему, что приводит к более выраженному эффекту при введении пластифицирующих добавок. Это наблюдается в том, что результат введения пластифицирующих добавок в композиционный цемент обычно более заметен, по сравнению с бездобавочным цементом, что может быть полезным при контроле свойств и характеристик композиционного цемента. Это приводит к снижению числа гидратных новообразований, на которых оседают поверхностно-активные вещества. Одной из возможных причин этого процесса является то, что минеральные добавки обладают меньшей активностью в сравнении с клинкером и не образуют такого количества гидратных продуктов. Это позволяет пластифицирующим добавкам лучше взаимодействовать с доступными поверхностями гидратов и проявлять свои свойства. Однако, следует отметить, что влияние ПАВ на смешанный цемент с минеральными добавками сложнее и зависит от многих факторов, включая состав и активность минеральных добавок, гранулометрический состав, соотношение компонентов и условия гидратации. Поэтому, чтобы полностью

понять влияние ПАВ на такие системы, необходимо проводить детальные исследования.

Выявлена более явная зависимость от введения пластифицирующих добавок при использовании высокоалюминатных цементов, что связано с особенностями их гидратации. Гидроалюминаты кальция, которые присутствуют в высокоалюминатных цементах, могут сорбировать или хемосорбировать пластифицирующие добавки. Это означает, что пластифицирующие добавки могут адсорбироваться на поверхности гидроалюминатов кальция, что снижает их «действующую» концентрацию в реагирующей системе. Когда это происходит, меньше поверхностно-активных веществ остается доступными для адсорбции на гидросиликатной фазе, что может снизить эффективность пластифицирующих добавок. Это объясняет более явную зависимость от введения пластифицирующих добавок при использовании высокоалюминатных цементов. Это важно учитывать при разработке и применении композиционных материалов на основе высокоалюминатных цементов, чтобы достичь требуемых свойств и характеристик материала. Гидроалюминаты кальция обладают поверхностными свойствами, которые привлекают и адсорбируют ПАВ. В результате, введение ПАВ в состав высокоалюминатных цементов имеет более выраженный эффект на свойства гидратационной системы в сравнении с портландцементом.

В некоторых случаях взаимосвязь между ПАВ и низкоактивными минеральными добавками является менее выраженной. Однако, даже в неблагоприятных условиях низкоактивные полиминеральные наполнители обычно несущественно влияют на эффективность ПАВ. С другой стороны, при введении ПАВ в цементные вяжущие с тонкомолотыми и гидравлически активными полиминеральными компонентами, такими как алюмосиликаты, необходимо учитывать, что часть ПАВ адсорбируется на этих активных частицах. Это приводит к уменьшению доступной концентрации ПАВ для взаимодействия с другими компонентами системы, включая CSH-фазу. Адсорбция ПАВ на активных минеральных компонентах вызвана их

поверхностными свойствами и химическим взаимодействием с ПАВ. Это приводит к уменьшению эффективности ПАВ и снижению их влияния на гидратацию и свойства цементной системы. Поэтому, при разработке цементных составов с использованием ПАВ и высокодисперсных минеральных компонентов, необходимо учитывать взаимодействие между ПАВ и активными минеральными компонентами, чтобы достичь требуемых свойств и оптимальной эффективности добавок.

Результаты выполненных исследований показывают, что поликарбоксилатный химический модификатор «Хидетал» активно взаимодействует с частицами КЦ благодаря высокой гидравлической активности и близким гранулометрическим составом тонкомолотого клинкера и высокодисперсной минеральной добавки. Это связано с высокой поверхностной активностью и большей поверхностью для взаимодействия с водой и другими компонентами смеси. Высокая гидравлическая активность тонкомолотого клинкера и высокодисперсной минеральной добавки приводит к более интенсивной реакции гидратации, что в свою очередь может усилить влияние пластифицирующих добавок. Пластифицирующие добавки могут легче адсорбироваться на поверхности частиц тонкомолотого клинкера и высокодисперсной минеральной добавки, что позволяет им более эффективно воздействовать на реагирующую систему и улучшать ее свойства. Это необходимо учитывать при разработке композиционных материалов, чтобы оптимизировать их свойства и достичь требуемого эффекта от введения пластифицирующих добавок. Сорбирование «Хидетала» на частицах цемента позволяет контролировать процессы структурообразования и создавать цементные композиционные материалы с заданными эксплуатационными характеристиками. Это означает, что «Хидетал» влияет на формирование структуры гидратационной системы, а также на физико-химические свойства и механическую прочность композиционного цемента. Таким образом, использование суперпластифицирующей добавки «Хидетал» способствует управлению процессами структурообразования в композиционном цементе и

созданию материалов с требуемыми свойствами. Это важно учитывать при разработке и производстве цементных строительных материалов, где требуются определенные характеристики.

Следующая стадия включает в себя определение рациональных значений процентного содержания АСС в КЦ (от 0 до 65 мас. %) и удельной поверхности композиционного цемента (от 300 до 700 м²/кг). В качестве контрольного образца выступил портландцементный клинкер, измельченный до удельной поверхности традиционного цемента – 300 м²/кг.

Установлено, что максимальное упрочнение КЦ (до 70 МПа) происходит при замещении 35 мас. % портландцементного клинкера алюмосиликатной составляющей, причем данная тенденция не зависит от удельной поверхности композиционного цемента. Последующее увеличение содержания АСС приводит к снижению прочностных свойств (рисунок 3.10).

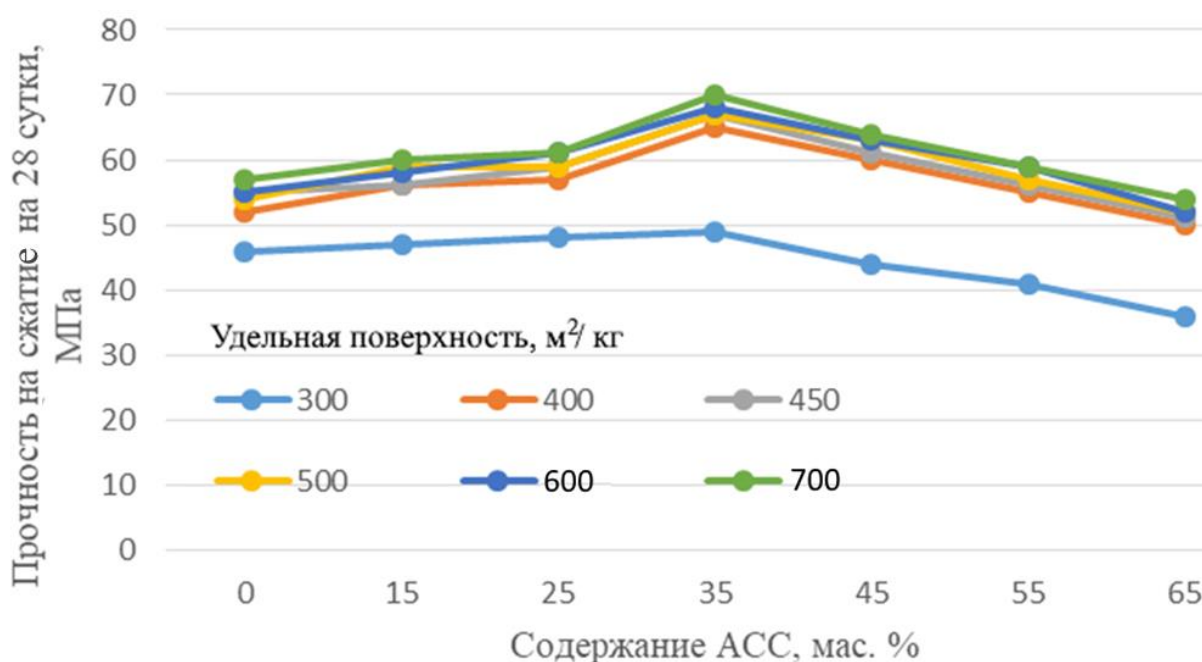


Рисунок 3.10 - Влияние дозировки АСС на прочностные свойства композиционного цемента

Другой важный вывод заключается в том, что удельные поверхности от 400 до 700 м²/кг композиционного цемента практически не приводят к его упрочнению, при том, что диспергация частиц выше 450 м²/кг влечёт за собой значительное повышение энергозатрат. Поэтому рациональной была принята удельная поверхность композиционного цемента 450 м²/кг. В результате

совместного влияния АСС и механохимической активации компонентов повышается активность композиционного цемента на 60%.

Таким образом, разработанные композиционные цементы имеют хороший потенциал для ремонта железобетонных сооружений: КЦ с максимальной прочностью (35% АСС) будут эффективны для усиления несущих конструкций.

3.2.2. Физико-механические и технологические свойства композиционных цементов

Рост дозировки алюмосиликатной составляющей оказывает небольшое влияние на удобоукладываемость композиционного цемента, повышая жесткость (таблица 3.4), что, в дальнейшем, при производстве торкрет-бетонов будет компенсировано путем управления соответствующим количеством суперпластифицирующей добавки.

Таблица 3.4 – Удобоукладываемость смесей и их уплотнение с возрастом

№ состава	Жесткость, с	$\rho_{\text{смеси}}$, кг/м ³	ρ_{28} , кг/м ³
Ц1	20	2047	1959
Ц2	20	2047	1980
КЦ-15	21	2044	1983
КЦ-25	21	2041	1986
КЦ-35	22	2038	1989
КЦ-35Б	22	2037	1993
КЦ-45	23	2034	1984
КЦ-55	23	2031	1981
КЦ-65	23	2028	1978

Выявлено снижение плотности затворенной смеси с уменьшением дозировки портландцемента за счет пропорционального снижения гипса (5% от ПЦ). Уплотнение 28-суточных образцов при росте содержания алюмосиликатной составляющей до 35 мас. % включительно связано с повышением плотности цементного камня за счет протекания пуццолановой реакции и ускорения процесса гидратации клинкерных минералов. Помимо

этого, рост объемной доли высокоплотной фазы CSH геля приведет к сокращению общего объема гелевых субмикропор. Еще более характерно это для образца с добавлением бетонного лома в связи с присутствием в нем некоторого количества непрогидратировавших минералов.

Начало схватывания отмечается не ранее, чем через 45 минут, что соответствует требованиям ГОСТ 31108-2020.

Повышение содержания АСС до 35 мас. % приводит к росту прочностных свойств композиционного цемента на всех этапах твердения ($R_{сж}$ до 51%, $R_{изг}$ до 57%), с максимальным эффектом для прочности в раннем возрасте, что дает возможность использовать композиционные цементы для срочного ремонта железобетонных объектов (таблица 3.5).

Бездобавочный образец характеризуется смесью продуктов гидратации, имеющих хлопьевидную и пористую структуру слабокристаллического C-S-H и слоев массивного $Ca(OH)_2$, внедренных через области геля C-S-H для цементного камня, гидратированного в течение 3 дней (рисунок 3.11 а). В этом цементном образце выявлены более широкие поры, которые доступны для кристаллизации образовавшихся гидратов. Микрофотография бездобавочного цементного камня, гидратированного через 28 дней, показывает, что образовалось большое количество геля C-S-H (рисунок 3.11 б). Это не только сформировало плотное поверхностное покрытие на частицах цемента, но также гидросиликатный гель присутствует в порах; этот цементный камень имеет более высокую степень гидратации.

Образец КЦ-35 (рисунок 3.11 в-г) состоит из плотной структуры кристаллогидратов C-S-H, имеющих плотную взаимосвязанную структуру. На микрофотографии видны более длинные палочковидные частицы C-S-H.

Поскольку частицы алюмосиликатов обладают высокой пуццолановой активностью, они будут реагировать с $Ca(OH)_2$, высвобождающимся при гидратации C_3S и $\beta-C_2S$, с образованием дополнительных C-S-H.

Таблица 3.5 – Механические свойства цементного камня на композиционном цементе

Свойства	Ц1	Ц2	КЦ-15	КЦ-25	КЦ-35	КЦ-35Б	КЦ-45	КЦ-55	КЦ-65
Прочность на сжатие, МПа									
на 2 сутки	16,6	21,0 (+27%)	21,7 (+31%)	22,0 (+33%)	29,1 (+49%)	29,6 (+51%)	22,5 (+36%)	21,1 (+28%)	20,9 (+27%)
на 7 сутки	23,4	30,8 (+32%)	31,3 (+34%)	31,6 (+35%)	34,2 (+46%)	35,2 (+50%)	32,4 (+38%)	31,7 (+35%)	25,9 (+11%)
на 28 сутки	45,9	52,2 (+14%)	52,7 (+15%)	53,2 (+16%)	67,7 (+47%)	69,3 (+51%)	53,7 (+19%)	53,1 (+16%)	52,6 (+15%)
$R_{сж}^2 / R_{сж}^{28}$	0,36	0,40	0,41	0,41	0,43	0,43	0,42	0,40	0,40
Прочность на растяжение при изгибе, МПа									
на 2 сутки	1,6	1,9 (+19%)	2,0 (+25%)	2,1 (+31%)	2,2 (+36%)	2,4 (+38%)	2,1 (+31%)	2,0 (+25%)	1,9 (+19%)
на 7 сутки	2,6	4,0 (+53 %)	4,1 (+57 %)	4,1 (+57%)	4,1 (+55%)	4,7 (+57%)	3,9 (+50%)	3,8 (+47%)	3,1 (+19%)
на 28 сутки	5,6	7,7 (+37%)	7,9 (+41%)	8,3 (+48%)	8,7 (+53%)	9,5 (+55%)	8,0 (+43%)	7,3 (+30%)	6,2 (+11%)
$R_{из}^2 / R_{из}^{28}$	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,31
$R_{из}/R_{сж.}, 2 \text{ сут.}$	0,09	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10
$R_{из}/R_{сж.}, 7 \text{ сут.}$	0,11	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
$R_{из}/R_{сж.}, 28 \text{ сут.}$	0,12	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12

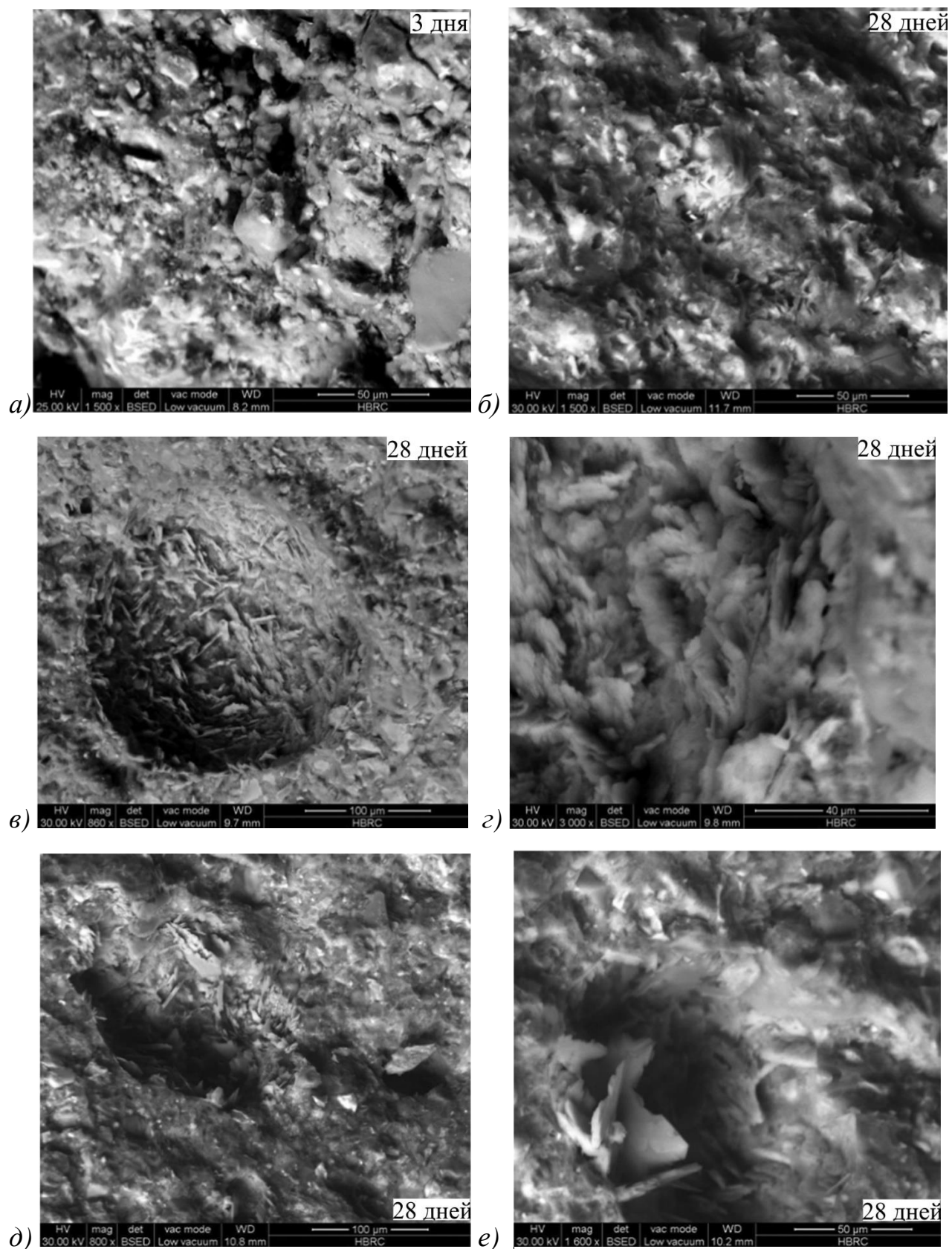


Рисунок 3.11 – Микроструктура образцов: а-б) Ц2, в-г) КЦ-35, д-е) КЦ-45

Наличие С-S-H в большом количестве отвечает за связывание частиц новообразований и формирование жесткой системы. Эти камни на

композиционном цементе имеют более высокую прочность на сжатие, чем на традиционном портландцементе. Установлено, что 35 мас. % АСС дает цементный камень с более однородной и плотной микроструктурой, чем при содержании 45 мас. %.

Образец КЦ-45 (рисунок 3.11 д-е) демонстрирует пористую структуру с более широкими порами, доступными для кристаллизации образовавшихся гидратов. Поэтому этот цементный камень имеет более высокую степень гидратации, но его прочность ниже из-за более высокой пористости. С другой стороны, частицы АСС заполняют эти поры и препятствуют росту кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$, что также способствует увеличению прочности. Прочность цементных растворов, содержащих алюмосиликаты, повысилась, как показано в этом исследовании.

Таким образом, при исследовании микроструктуры цементного камня контрольный состав на рисунке 3.12 а показывает, что после 28 суток твердения пустоты между частицами клинкера заполнены продуктами гидратации, но при этом наблюдалось множество связанных капиллярных пор. Это указывает на наличие связанных пор, которые могут оказывать негативное влияние на прочностные свойства материала.

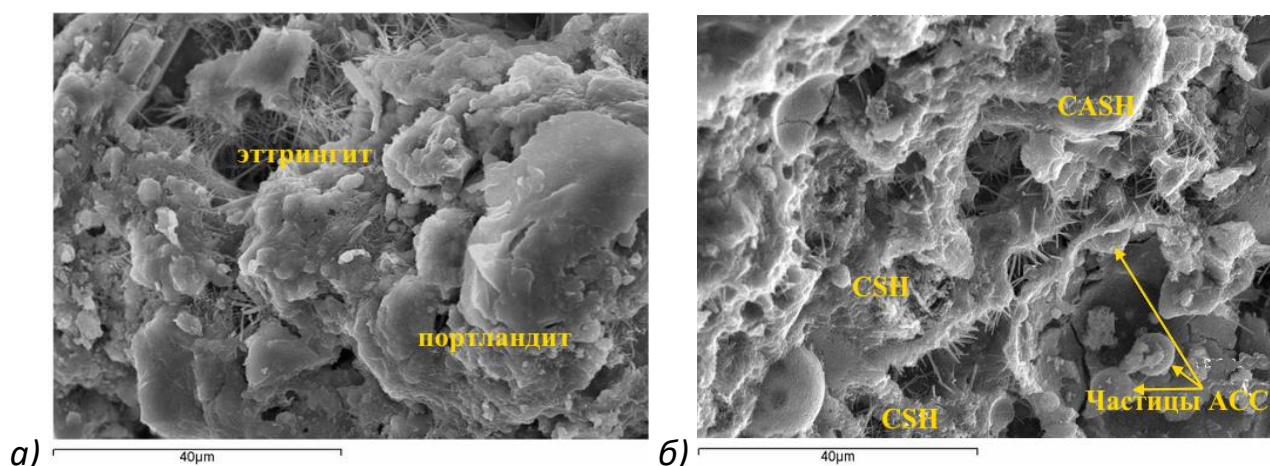


Рисунок 3.12 - Микроструктура: а) контрольный состав Ц2, б) состав с 35% АСС (КЦ-35)

Однако, при использовании адмиксии алюмосиликатной составляющей в количестве 35 мас. % (рисунок 3.12 б), отмечена более плотная структура

продуктов гидратации. Данный факт говорит о том, что плотность упаковки кристаллогидратов значительно улучшается, блокируя связные поры. Использование АСС способствует более эффективной гидратации цементных частиц и формированию более плотной структуры гидратационной системы. Это приводит к улучшению механических свойств и плотности материала, а также снижению проницаемости для воды и других вредных веществ. В целом, результаты указывают на положительное влияние использования АСС на структуру и свойства гидратационной системы цемента, что является важным при проектировании и производстве бетонных строительных материалов с требуемыми характеристиками.

Дифференциально-термический анализ также подтверждает полученные результаты. При этом, сравнение образцов осуществлялось в пересчете на равное содержание клинкера в образцах разной массы, чтобы можно было адекватно оценивать состав и содержание продуктов гидратации. И бездобавочный образец и, состав, имеющий 35 мас. % АСС, демонстрируют схожие аналогичные эндоэффекты, отличаясь исключительно продуктами гидратации: при 100-140°C (CSH и AFt фазы), 180°C (C_4AH_{19}), 600°C ($Ca(OH)_2$), 750 и 780°C ($CaCO_3$) и 940°C (CSH) (рисунок 3.13).

Установлена связь между уменьшением площади эндотермического эффекта и снижением наличия гелеобразных продуктов гидратации в модифицированном цементном камне. Эндотермический эффект, который характеризует испарение физически связанной адсорбционной воды из новообразований цементного камня при 100-140°C, связан с наличием гелеобразных продуктов гидратации, которые обладают высокой плотностью и могут содержать большое количество связанной воды. Однако, в модифицированном цементном камне, где наблюдается снижение наличия гелеобразных продуктов гидратации, площадь эндотермического эффекта уменьшается. Это может быть обусловлено кристаллизацией гелеобразных продуктов гидратации, что приводит к образованию более компактной структуры и снижению количества связанной воды. Таким образом, снижение

наличия гелеобразных продуктов гидратации и кристаллизация их в модифицированном цементном камне может привести к уменьшению площади эндотермического эффекта и, следовательно, к снижению испарения физически связанной адсорбционной воды при определенной температуре.

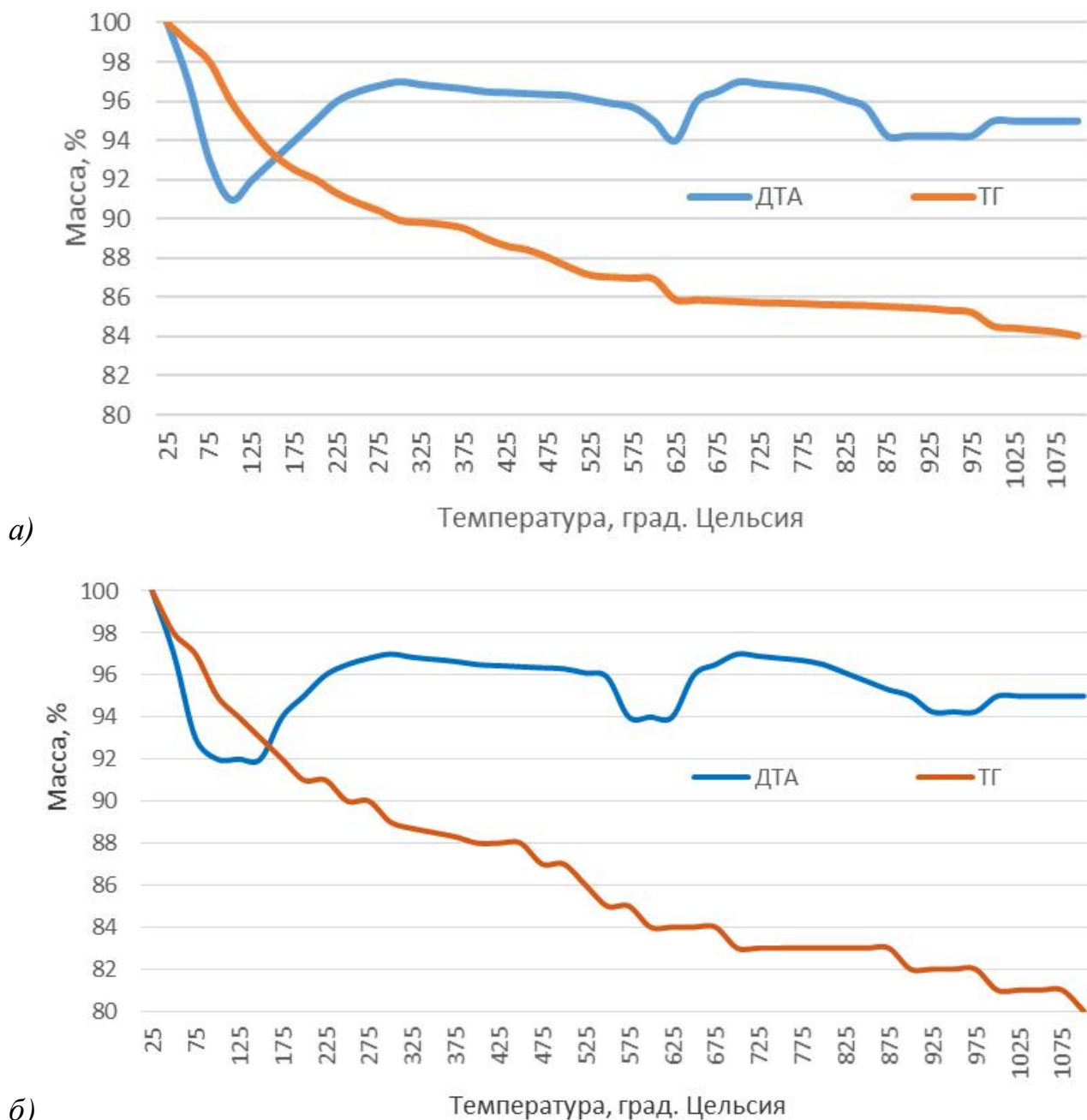


Рисунок 3.13 – Результаты ДТА: а) КЦ-35, б) Ц2

Выявлено различие в эндотермических эффектах, связанных с дегидратацией портландита, в бездобавочном цементном камне и в модифицированном цементном камне. При повышенных температурах, около

600°C, происходит дегидратация портландита, что приводит к образованию CaO и выделению воды. Этот процесс является эндотермическим, то есть требует поглощения тепла. В бездобавочном цементном камне, где отсутствуют модифицирующие добавки, содержание Ca(OH)₂ выше, что отражается на термограмме в виде более выраженного эндотермического эффекта. Это связано с тем, что бездобавочный цементный камень содержит больше гидроксида кальция, который образуется в результате гидратации портландита. В модифицированном цементном камне, где присутствует добавка АСС, содержание Ca(OH)₂ снижено. Это связано с тем, что модифицирующие добавки препятствуют образованию или уменьшают количество гидроксида кальция в матрице цемента. Таким образом, сравнивая эндотермические эффекты на термограмме при дегидратации портландита, можно заметить, что бездобавочный цементный камень может иметь более высокую площадь пика, что указывает на большее содержание Ca(OH)₂, в то время как модифицированный цементный камень может иметь меньшую площадь пика, свидетельствуя о сниженном содержании Ca(OH)₂.

Установлено различие в высокотемпературных гидросиликатных эндотермических эффектах между немодифицированным образцом Ц2 и составом КЦ-35 при температуре 940°C. Высокотемпературный гидросиликатный эндоэффект связан с термическим разложением гидросиликатов в цементном камне. При повышенных температурах, около 940°C, гидросиликаты разлагаются, что приводит к выделению воды и диоксида кремния. Этот процесс также является эндотермическим, то есть требует поглощения тепла. В модифицированном образце КЦ-35 высокотемпературный гидросиликатный эндоэффект более выражен, что отражается на термограмме в виде пика большей площади. Это связано с особенностями состава образца КЦ35, который содержит большее количество гидросиликатов или более реакционноспособные гидросиликаты, чем состав Ц2. Состав Ц2, с другой стороны, имеет менее выраженный высокотемпературный гидросиликатный

эндоэффект из-за меньшего содержания гидросиликатов или менее реакционноспособных гидросиликатов в составе.

Выявленные закономерности подтверждаются данными РФА (рисунок 3.14, таблица 3.6).

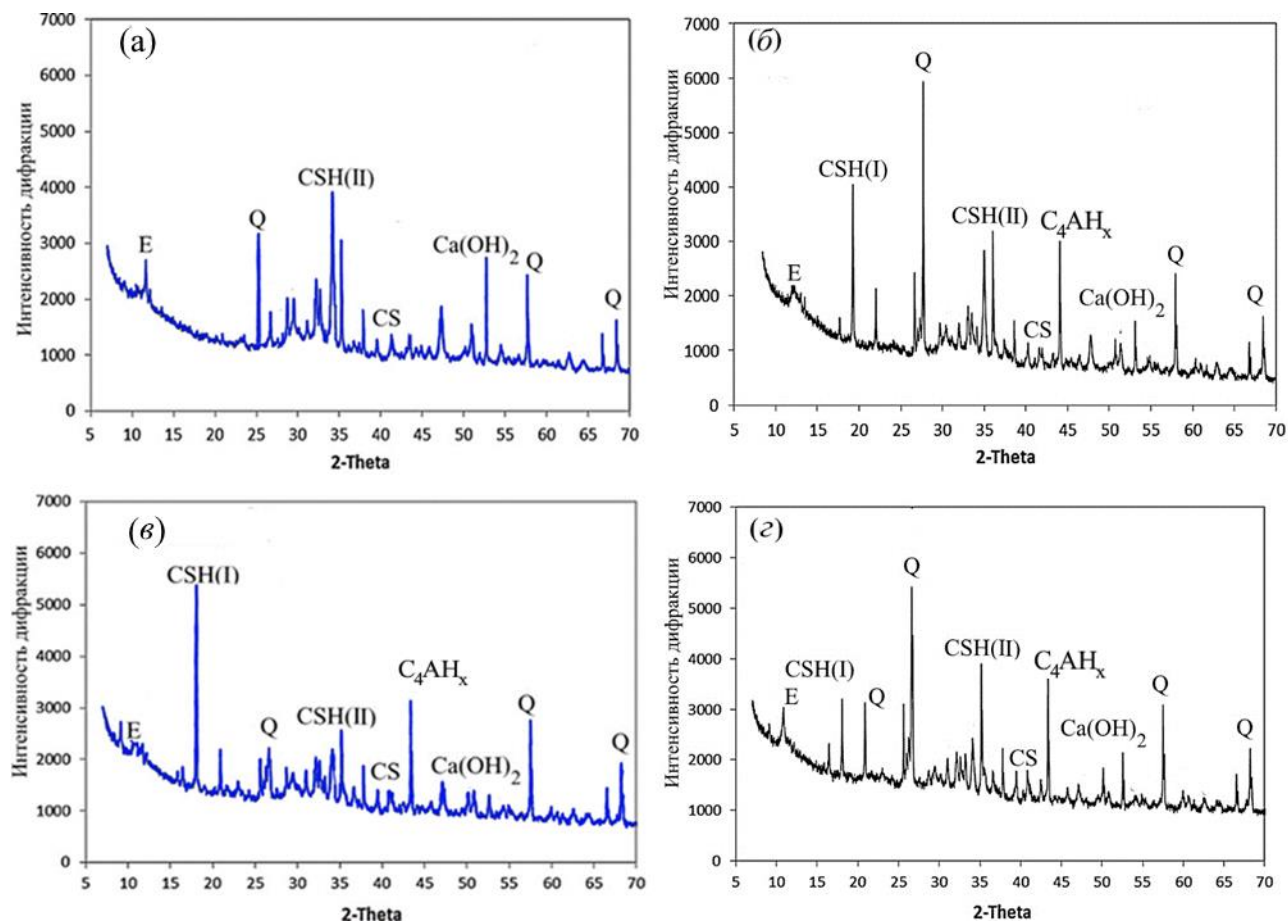


Рисунок 3.14 – Результаты РФА 28-суточных образцов: а) Ц2; б) КЦ-25; в) КЦ-35; г) КЦ-45; Е – этtringит, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – портландит, Q – кварц, CS – силикаты кальция, CSH(I) и CSH(II) – низкоосновных и высокоосновный гидросиликат кальция, C_4AH_x – гидроалюминат кальция

Установлено наличие гидросиликатов кальция CSH(I) и CSH(II), гидроалюмината кальция C_4AH_x , портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$, силикатов кальция CS (C_2S и C_3S) и кварца SiO_2 , где низкоосновный гидросиликат кальция и гидроалюминат кальция образуется в заметном количестве во всех разработанных составах. В качестве продукта гидратации клинкера гидроксид кальция реагирует с АСС в системе композиционного цемента и образует CSH второй генерации, что приводит к улучшению механических свойств строительных растворов. По шкале РФА CSH(I) имеет сильный пик, расположенный под углом 2Θ $18,05^\circ$. Пик CSH(I) считается

основным индикатором эффективности образцов цементного теста. Кроме того, эттрингит и CSH(I), как важные составляющие гидратации клинкера, также отмечаются с небольшой интенсивностью. А также, безымянные пики с высокой интенсивностью идентифицируются как стандартные при испытаниях (фаза корунда), который не был включен в расчет содержания фаз.

Таблица 3.6 – Результаты количественного РФА образцов в возрасте 28 сут., %

Фаза	Ц2	КЦ-25	КЦ-35	КЦ-45
Силикаты кальция (алит и белит)	0,6	3,2	4,1	5,0
Эттрингит	0,5	0,5	0,4	0,5
Портландит	5,6	5,4	4,3	5,0
Низкоосновный гидросиликат кальция	3,7	3,2	2,1	3,2
Высокоосновный гидросиликат кальция	6,5	15,1	16,8	16,6
Кварц	11,1	14,6	10,3	15,7
Аморфная фаза	62	58	52	54

Выявлено положительное влияние алюмосиликатной составляющей в композиционном цементе на рост содержания низкоосновных гидросиликатов кальция (рисунок 3.14). Из результатов РФА видно, что интенсивность самого высокого пика низкоосновных гидросиликатов кальция в образцах, содержащих 25 и 35 мас. % алюмосиликатов, повысилась до 6100 и 6500 по сравнению с 5800 у контрольного бездобавочного образца. Это указывает на увеличение содержания CSH(I) в присутствии АСС.

Однако интересно отметить, что при дальнейшем повышении содержания АСС до 45 мас. % интенсивность пика снова снижается до 6100. Это может быть связано с тем, что при таком высоком содержании АСС происходит некий оптимальный баланс между формированием CSH(I) и других фаз, и дальнейшее увеличение содержания АСС может привести к нежелательным изменениям в структуре или составе цементного материала. Таким образом, добавка АСС в композиционный цемент может положительно влиять на рост содержания низкоосновных гидросиликатов кальция, но оптимальное содержание АСС может быть важным фактором для достижения наилучших результатов в формировании CSH(I).

Комплекс полученных результатов подтверждает плотную микроструктуру цементной матрицы с содержанием алюмосиликатов до 35 мас. %.

Разработанные композиционные цементы являются быстротвердеющими по классификации ГОСТ 31108-2020, что доказано отношением $R_{сж}^2 / R_{сж}^{28}$ выше 0,4 (до 0,43). В отличие от бездобавочного образца ($R_{сж}^2 / R_{сж}^{28} = 0,36$), в разработанных композиционных цементах отмечено повышение скорости кинетики гидратации алита и трехкальциевого алюмината и протекание пуццолановой реакции в первые 48 часов. Схожая картина выявлена и при работе модифицированных составов на растяжение при изгибе: отношение $R_{из}^2 / R_{из}^{28}$ возросло до 0,31 по сравнению с аналогичной характеристикой для контрольных немодифицированных составов (0,24), что также объясняется вышеприведенными причинами.

Доказано, что рост прочности на растяжение при изгибе КЦ, модифицированного АСС, повышался при увеличении содержания АСС до 35 мас. % и при этом уменьшался с возрастом, как и для прочности на сжатие. Приращение прочности на сжатие оказывается не столь значительным по сравнению с приращением прочности на растяжение при изгибе, что объясняется тем, что цементный камень работает лучше на сжатие, чем на изгиб. Приращение обоих видов прочности находится в зависимости от ряда факторов:

- рост скорости гидратации клинкерных минералов;
- увеличение объема гидратных новообразований;
- рост объемного содержания CSH(I) в результате пуццолановой реакции.

Важным для создания ударопрочной структуры является соотношение $R_{из}^{28} / R_{сж}^{28}$, которое для модифицированных составов достигало значений 0,13-0,14 в табл. 3.5 0,13-0,14) (при аналогичной характеристике у бездобавочного цементного камня 0,12).

Установленные результаты доказывают техническую эффективность применения разработанного композиционного цемента с достижением высоких значений физико-механических свойств цементного камня в разном возрасте.

Разработанные композиционные цементы соответствуют требованиям ГОСТ 31108-2020 для ЦЕМ V (композиционный цемент) (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Соответствие разработанных цементов ГОСТ 31108-2020

Характеристика	КЦ	ЦЕМ V по ГОСТ 31108-2020
Состав, мас. %	<u>КЦ-35, КЦ-45, КЦ-55:</u> клинкер - 45-65, АСС - 35-55, вспомогательные компоненты - 0	<u>ЦЕМ V/A:</u> клинкер - 40-64, доменный гранулированный шлак - 18-30, пуццолана, глиеж, зола-уноса - 18-30, вспомогательные компоненты - 0-5
	<u>КЦ-65:</u> клинкер - 35, АСС - 65, вспомогательные компоненты - 0	<u>ЦЕМ V/B:</u> клинкер - 20-38, доменный гранулированный шлак - 31-49, пуццолана, глиеж, зола-уноса - 18-30, вспомогательные компоненты - 0-5
Прочность на сжатие на 2 сутки, МПа	<u>КЦ-35:</u> 29,1	<u>52.5Б:</u> 30
Прочность на сжатие на 28 сутки, МПа	<u>КЦ-35:</u> 67,7	<u>52.5Б:</u> 30
Начало схватывания, мин	<u>КЦ-35:</u> 45	<u>52.5Б:</u> ≥ 45
Конец схватывания, мин	225-360	не нормируется
Равномерность изменения объема (расширение), мм	≤ 10	0-1,5

Полученные результаты подтверждают техническую эффективность использования разработанного композиционного цемента с достижением высоких значений физико-механических свойств цементного камня в разном возрасте.

3.3. Выводы

1. Разработана методика комплексной оценки технического состояния подземных сооружений, анализирующая вклад степени износа конструкционного материала. В результате натурных обследований по разработанной методике установлена высокая степень износа конструкций городских подземных сооружений.

2. Разработанная алюмосиликатная составляющая характеризуется таким гранулометрическим, химическим и минеральным составом, который перспективен для использования в роли полиминеральной добавки в композиционном цементе.

3. Разработанные композиционные цементы имеют хороший потенциал для ремонта железобетонных сооружений: вяжущие с максимальной прочностью содержат 35 мас. % АСС.

4. Полученные результаты подтверждают техническую эффективность использования разработанного композиционного цемента с достижением высоких значений физико-механических свойств цементного камня в разном возрасте.

4. СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ТОРКРЕТ-БЕТОНОВ НА КОМПОЗИЦИОННЫХ ЦЕМЕНТАХ

4.1. Разработка составов торкрет-бетонов

Разработана линейка торкрет-бетонов из композиционных цементов с удельной поверхностью 450 м²/кг, что позволяет применять их для различных строительных целей. В качестве мелкого заполнителя применялся полифракционный отсев дробления гранитного щебня с модулем крупности 2,7. Портландцементный клинкер замещался АСС в варьируемом диапазоне от 0 до 35 мас. %. В/В составляло 0,3-0,4, а пропорция вяжущего и заполнителя была 1 к 3.

Таблица 4.1- Разработанные композиции торкрет-бетонов

№ состава (используемый цемент)	Материалоемкость, кг на 1 м ³								В/В
	Клинкер	АСС	Гипс	Бетонный лом	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	12,4	67,5	135	3,375	2,25	1350	0,3
ТБ11(КЦ-35Б)	292,5	157,5	12,4	67,5	157,5	3,375	2,25	1350	0,35
ТБ12(КЦ-35Б)	292,5	157,5	12,4	67,5	180	3,375	2,25	1350	0,4

В таблице 4.2 приведены показатели водоотделения торкрет-бетонных смесей. Установлено низкое водоотделение до 16% через 230 минут. Соответственно, данные материалы являются эффективными для торкрет-бетонных работ.

Технологические свойства торкрет-бетонов и динамика развития их плотности приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.2 – 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

Таблица 4.3 – Свойства смеси и развитие плотности

Состав	Жесткость, с	Средняя плотность смеси, кг/м ³	Средняя плотность на 28 сутки ($\Delta\rho^{28}$), 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%)

Достижение равной жесткости торкрет-бетонов (20-22 с) проводилось путем применения поликарбоксилатного химического модификатора, который обладает повышенной водоредуцирующей способностью (40%).

Выявлено, что плотность затворенной смеси растет с повышением содержания АСС в КЦ. При этом, введение алюмосиликатной составляющей в малых количествах (до 25 мас. %) незначительно повышает плотность цементного камня после 28 суток твердения (от 2 до 5%). Это связано с тем, что алюмосиликаты имеют меньший размер частиц по сравнению с основным компонентом цемента. При гидратации цемента эти тонкие зерна заполняют

пустоты между частицами вяжущего, что приводит к более плотной структуре цементного камня, что имеет ряд преимуществ. Во-первых, повышается прочность материала, так как более плотная структура обеспечивает лучшую связь между частицами. Во-вторых, более плотный цементный камень более устойчив к проникновению влаги или других агрессивных веществ, что может улучшить его водонепроницаемость и долговечность. Это связано с заполнением пустот, возникших в результате гидратации, мелкодисперсными частицами алюмосиликатов. С увеличением содержания алюмосиликатной составляющей до 35 мас. % отмечается дальнейший рост плотности образцов в марочном возрасте, причем этот рост линейно увеличивается с повышением процентного содержания АСС, что связано с протеканием пуццолановой реакции, которая происходит между алюмосиликатами и клинкерными минералами, а также ускорением кинетики гидратации алита и трехкальциевого алюмината. Таким образом, введение алюмосиликатной составляющей в композиционный цемент приводит к увеличению плотности цементного камня, что важно для улучшения механических свойств и прочности материала. Помимо этого, рост содержания высокоплотной фазы CSH(I) будет способствовать снижению объема гелевой субмикроструктуры.

Выявлен эффект роста прочности на сжатие торкрет-бетонов на основе композиционного цемента, который увеличивается с ростом дозировки алюмосиликатной составляющей до 35% по массе. Интересно отметить, что максимальный эффект от добавки алюмосиликатной составляющей наблюдается для значений ранней прочности, особенно в возрасте 2 суток. Исследование показало, что прочность на сжатие торкрет-бетона с добавкой алюмосиликатной составляющей возрастала на 62% по сравнению с бездобавочным составом в возрасте 2 суток. Это значительное увеличение прочности может быть очень полезным для обеспечения быстрой и надежной фиксации на торкретируемой конструкции и ее укрепления.

Прочность на растяжение при изгибе также увеличивалась на 49% в этом же возрасте. Это говорит о том, что добавка АСС способствует значительному

повышению ранней прочности торкрет-бетона. Кроме того, выявлено высокое отношение значений прочностных свойств во 2 и 28 сутки. Для прочности на сжатие это отношение составляет 0,41 (по сравнению с 0,33 у контрольных клинкерных составов), а для прочности на растяжение при изгибе - 0,30 (по сравнению с 0,26 у бездобавочных клинкерных составов). Это подтверждает стабильность и сохранение высокой прочности торкрет-бетона с добавкой АСС на протяжении всего периода эксплуатации. Высокая ранняя прочность торкрет-бетона с добавкой АСС позволяет эффективно использовать его для срочного ремонта железобетонных сооружений, где требуется быстрое восстановление структурной прочности (таблица 4.4).

К семисуточному возрасту скорость роста прочностных свойств торкрет-бетона с добавкой АСС в некоторой степени стабилизируется, но все еще превышает значения контрольного состава. Выявлено, что прочность на сжатие увеличилась на 20%, а прочность на растяжение при изгибе увеличилась на 28% по сравнению с контрольным составом.

Важным результатом является то, что отношение прочности на растяжение при изгибе к аналогичной характеристике на сжатие в семисуточном возрасте (0,14) превышает эти значения для контрольного состава из молотого клинкера. Несмотря на замещение портландцементного клинкера до 35% алюмосиликатной составляющей, наблюдается повышение прочности на сжатие и на растяжение при изгибе. Это указывает на развитие трещиностойкости материала, что является важным свойством для конструкций, подверженных различным нагрузкам и воздействию окружающей среды. Кроме того, для рационально разработанного состава торкрет-бетона (ТБ11) отношение прочностей на растяжение при изгибе и на сжатие также повышается с возрастом. Это означает, что с течением времени прочность материала улучшается, и в марочном возрасте достигает значения 0,15, что превосходит значения контрольных составов.

Таблица 4.4 – Прочностные свойства торкрет-бетонов

Свойства	ТБ1	ТБ2	ТБ3	ТБ4	ТБ5	ТБ6	ТБ7	ТБ8	ТБ9	ТБ10	ТБ11	ТБ12
Прочность на сжатие, МПа на 2 сутки	18,9	23,6 (+25%)	23,8 (+26%)	25,6 (+36%)	28,9 (+53%)	28,2 (+49%)	27,4 (+45%)	29,4 (+56%)	28,9 (+53%)	28,7 (+52%)	30,5 (+62%)	28,1 (+49%)
на 7 сутки	32,7	34,8 (+6%)	33,6 (+3%)	35,0 (+7%)	37,1 (+13%)	36,2 (+11%)	36,1 (+10%)	38,2 (+17%)	37,3 (+14%)	37,2 (+14%)	39,3 (+20%)	38,4 (+17%)
на 28 сутки	56,9	59,2 (+4%)	58,1 (+2%)	64,2 (+13%)	72,3 (+27%)	68,8 (+21%)	68,5 (+20%)	73,5 (+29%)	72,3 (+27%)	70,0 (+23%)	74,4 (+31%)	70,4 (+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 на 2 сутки	2,1	2,6 (+24%)	2,6 (+24%)	2,7 (+29%)	3,1 (+47%)	3,1 (+47%)	3,1 (+47%)	3,1 (+47%)	3,1 (+47%)	3,1 (+47%)	3,2 (+49%)	3,1 (+47%)
на 7 сутки	4,3	4,5 (+2 %)	4,4 (+1%)	4,9 (+14%)	5,2 (+21%)	5,1 (+19%)	5,1 (+19%)	5,3 (+23%)	5,2 (+21%)	5,2 (+21%)	5,5 (+28%)	5,4 (+26%)
на 28 сутки	8,0	8,3 (+4%)	8,1 (+1%)	9,6 (+20%)	10,8 (+35%)	10,3 (+29%)	10,3 (+29%)	10,5 (+31%)	10,8 (+35%)	10,5 (+31%)	11,2 (+40%)	10,6 (+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

Выявлено, что материалы на основе КЦ обладают более интенсивным набором прочности по сравнению с контрольными образцами из молотого клинкера. Это объясняется положительным влиянием поликарбоксилатного химического модификатора и активных наполнителей, которые способствуют ускорению гидратации алита и трехкальциевого алюмината, а также повышению тепловыделения. Суперпластификаторы позволяют снизить водопотребность материала, что ведет к улучшению его плотности и компактности. Это способствует более эффективной гидратации клинкерных минералов и формированию более прочной структуры. Кроме того, суперпластификаторы также влияют на реологические свойства материала, обеспечивая его более равномерное распределение и заполнение пустот.

Полиминеральные компоненты, такие как алюмосиликаты, активно участвуют в гидратации и пуццолановой реакции с клинкерными минералами. Это способствует более интенсивной реакции и образованию дополнительных прочных продуктов гидратации.

Повышение плотности материала на композиционных цементах имеет положительное влияние на его эксплуатационные характеристики и долговечность. Как результат повышения плотности материала происходит снижение капиллярной пористости, а значит и проницаемости материала для жидкостей и газов. Это влечет за собой целый ряд преимуществ:

1. *Улучшенная водонепроницаемость*: уменьшение капиллярной пористости и проницаемости материала снижает возможность проникновения воды и влаги в его структуру. Это способствует улучшению водонепроницаемости и защите от влагообмена, что особенно важно для материалов, используемых в строительстве и ремонте подземных сооружений или объектов, подверженных воздействию влаги.

2. *Улучшенная устойчивость к химическому воздействию*: снижение проницаемости материала также означает, что он будет менее подвержен химическому воздействию различных агрессивных сред, таких как кислоты, щелочи и другие химически активные вещества. Это повышает устойчивость материала к коррозии и деградации.

3. *Улучшенная механическая прочность*: уплотнение микроструктуры материала способствует повышению его механической прочности. Уменьшение пористости и повышение плотности материала улучшает его способность сопротивляться воздействию внешних нагрузок и деформаций, что ведет к улучшению его прочностных свойств.

4. *Улучшенная долговечность*: все вышеуказанные факторы - улучшенная водонепроницаемость, устойчивость к химическому воздействию и повышенная механическая прочность в комплексе позволяют рассчитывать на высокую долговечность материалов и конструкций, изготовленных из них.

Торкрет-бетоны обладают высокой прочностью и устойчивостью к различным воздействиям, таким как нагрузки, вибрации, воздействие агрессивных сред и другие внешние факторы. Использование торкрет-бетонов для усиления несущих (ограждающих) конструкций позволяет значительно улучшить их механические свойства и продлить их срок службы.

Исходя из предварительных исследований, толщина ремонтного слоя около 6 см обычно является достаточной для обеспечения необходимой прочности и усиления конструкций. При этом, важно учесть правильное надежное сцепление между ремонтным слоем и основными конструкциями.

Таким образом, использование разработанных торкрет-бетонов с толщиной ремонтного слоя около 6 см позволяет не только обеспечить необходимую степень усиления несущих элементов, но и эксплуатировать отремонтированные сооружения в качестве объектов двойного назначения.

4.2. Исследование ударной стойкости торкрет-бетонов

Изучение ударного поведения разработанных материалов подтвердило, что с ростом содержания алюмосиликатной составляющей увеличивается количество трещин, ширина раскрытия, а также возрастает коэффициент извилистости трещин K_{curv} (рисунок 4.1). Эти закономерные результаты подтверждают полученные ранее значения характеристик прочности на растяжение при изгибе и ее отношением к прочности на сжатие.

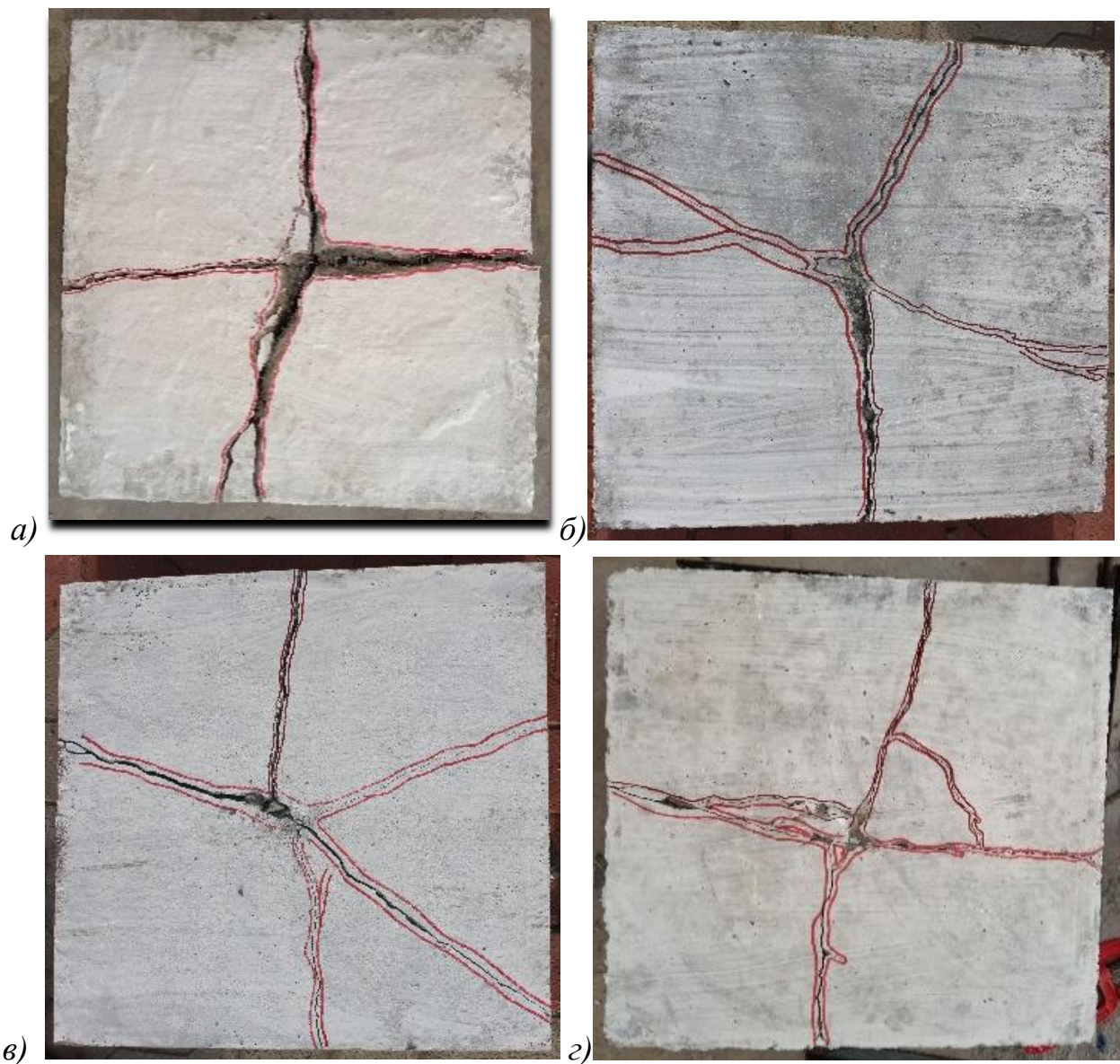


Рисунок 4.1 - Характер разрушения образцов-плит: а) ТБ1, б) ТБ5, в) ТБ8, з) ТБ11

Коэффициент извилистости трещин, являющийся соотношением 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 4.2.

Исследовалась энергия, затраченная на разрушение 28-суточного образца размером 600×600 мм (в пересчете на один квадратный метр) (рисунок 4.3). Показатели ударпрочности (N_{ff} , N_{cd} , μ) всех разработанных материалов росли при повышении содержания АСС, демонстрируя гораздо большее процентное приращение, чем у прочности на сжатие и на растяжение при изгибе (рисунки 4.4). Наибольший эффект отмечен для приращения числа ударных воздействий до отказа исследуемого образца.

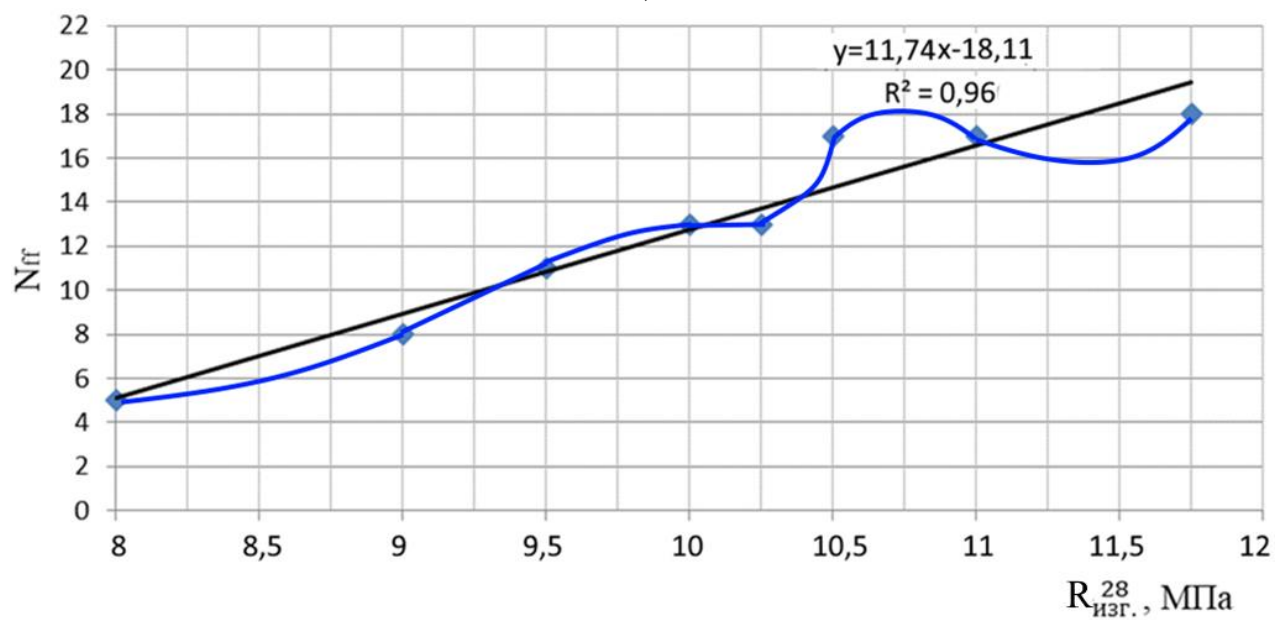


Рисунок 4.2– Характер разрушения образца ТБ11. Коэффициент извилистости на различных участках $K_{cuv} = l_f / l_s$: 1 - $\frac{52 \text{ см}}{34 \text{ см}} = 1,53$; 2 - $\frac{58 \text{ см}}{35 \text{ см}} = 1,66$; 3 - $\frac{57 \text{ см}}{34 \text{ см}} = 1,68$

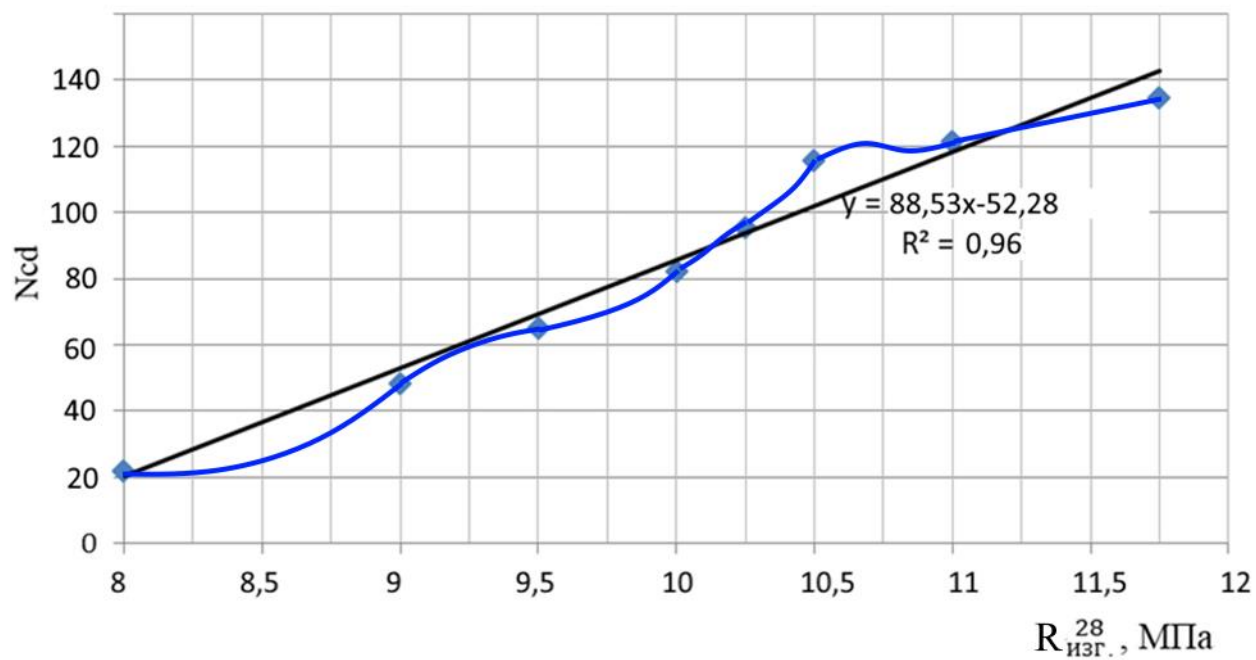
	Количество ударов до первой трещины N_{ff}	Ударная энергия до образования первой трещины, Дж	Количество ударов до разрушения образца N_{cd}	Ударная энергия до разрушения образца, Дж	Коэффициент ударной вязкости $\mu = N_{cd} / N_{ff}$
ТБ1	5	295	25	1475	5
ТБ2	5	295	30	1770	6
ТБ3	4	236	20	1180	5
ТБ4	8 (+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 %)

Рисунок 4.3 – Характеристики ударпрочности бетонов

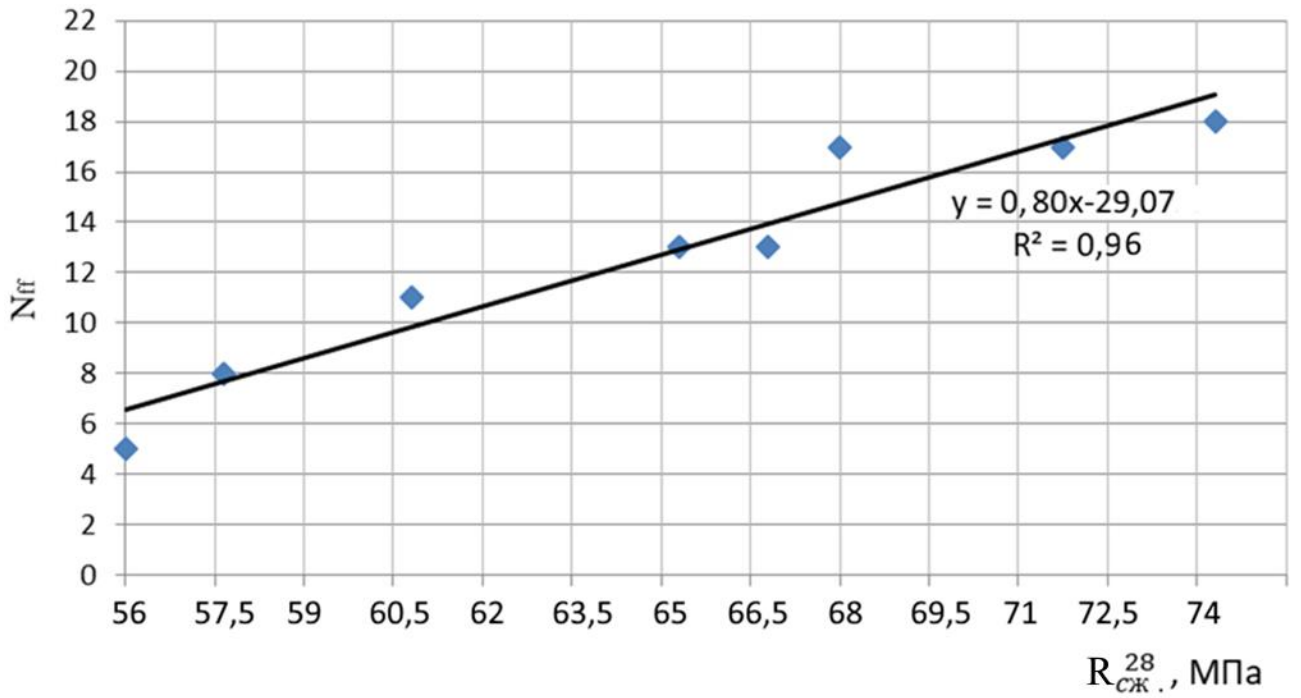
a)



б)



в)



г)

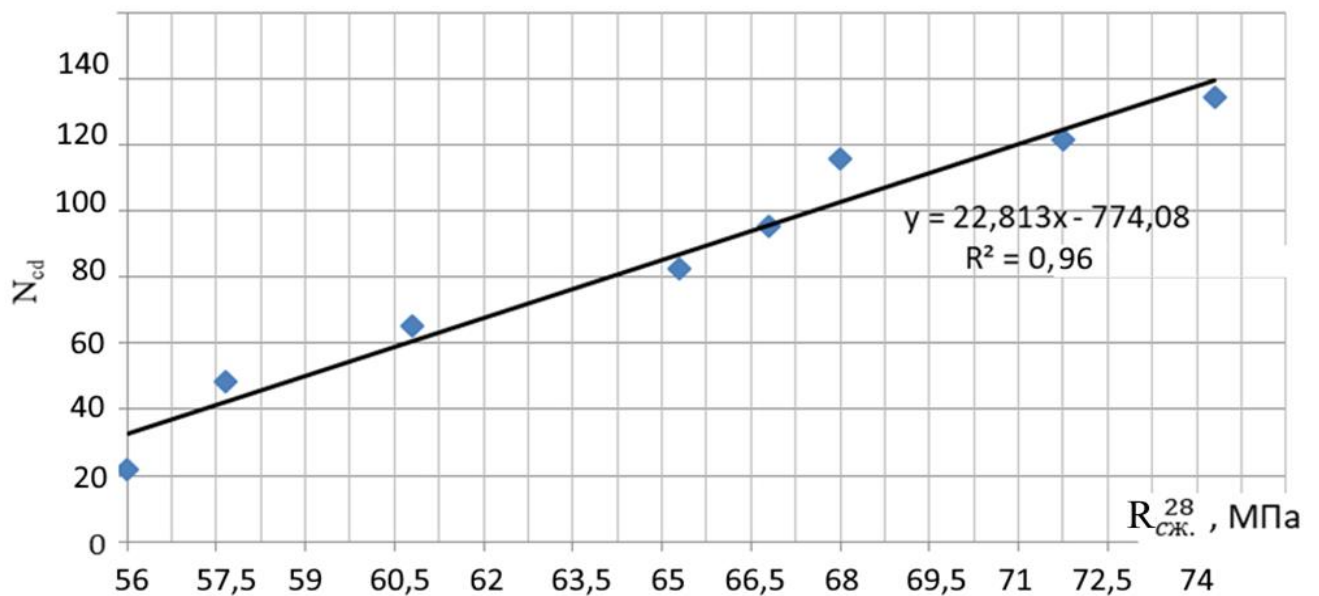


Рисунок 4.4 - Зависимости между прочностными свойствами и характеристиками ударпрочности: а) $N_{ff} - R_{изг}^{28}$; б) $N_{cd} - R_{изг}^{28}$, в) $N_{ff} - R_{сж}^{28}$, г) $N_{cd} - R_{сж}^{28}$,

Применение композиционного цемента позволило добиться в несколько раз большего числа ударных воздействий до отказа исследуемого образца: для образца ТБ11 это число составляло 171, что на 584% выше аналогичной характеристики для контрольного образца.

Техническая эффективность действия композиционного цемента обоснована ростом объемного содержания высокоплотной фазы

гидросиликатного геля, повышением адгезии цементного камня с мелким наполнителем и ростом напряжения сдвига.

Коэффициент ударной вязкости μ рос с увеличением содержания алюмосиликатной составляющей. С точки зрения физико-химических процессов, увеличение количества ударов, как до начала трещинообразования, так и до разрушения образца, с ростом содержания АСС, имеет схожие причины с увеличением значений прочностных свойств: объясняется уплотнением и упрочнением структуры в результате пуццолановой реакции.

Композиционный цемент обеспечивает ряд позитивных для структурообразования условий:

- ускорение гидратационных процессов между клинкерными минералами и водой;

- появление низкоосновных гидросиликатов кальция второй генерации с одновременным снижением количества образуемого портландита в результате связывания гидроксида кальция;

- уплотнение микроструктуры с закономерным протеканием пуццолановой реакции, росту содержания низкоосновного гидросиликатного геля и снижению пористости твердеющего композита;

- кроме того, мелкодисперсные частицы алюмосиликатов заполняют мезо- и макропоры цементной матрицы (кольматация на макроуровне), а также выступают в роли центров кристаллизации новообразований.

Разработанные образцы показывают линейную зависимость характеристик ударопрочности (количество ударов до начала трещинообразования и до разрушения образца) от значений прочности на сжатие и на растяжение при изгибе. Все статистические факторы принимали значение выше 0,95, что свидетельствует о высокой сходимости и достоверности.

Таким образом, разработанные торкрет-бетоны способны выдержать на 280% большее количество ударов до начала трещинообразования и на 584% количество ударов до потери структурной целостности образца.

4.3. Эксплуатационные характеристики торкрет-бетонов

Разработанный торкрет-бетон, содержащий 35% алюмосиликатной составляющей, обладает хорошей водонепроницаемостью, что было определено в соответствии с ГОСТ 12730.5. Согласно этому стандарту, отсутствие фильтрования воды на противоположной грани кубического образца с ребром 10 см было подтверждено в течение 12 часов при давлении 1,6 МПа. Это позволяет отнести разработанный торкрет-бетон к марке W16 по водонепроницаемости. Для сравнения, контрольный немодифицированный состав показал марку по водонепроницаемости W6. Это означает, что он имеет более низкую водонепроницаемость по сравнению с разработанным торкрет-бетоном.

Таким образом, разработанный торкрет-бетон с алюмосиликатной составляющей обладает более высокой водонепроницаемостью (марка W16) по сравнению с контрольным немодифицированным составом (марка W6). Изучая кинетику водопоглощения материалов, установлено, что при модифицировании разработанного торкрет-бетона, с повышением содержанием АСС снижается размерность и общий объем капиллярной пористости материала, что подтверждается ростом марки по водонепроницаемости с W6 по W16 (рисунок 4.5).

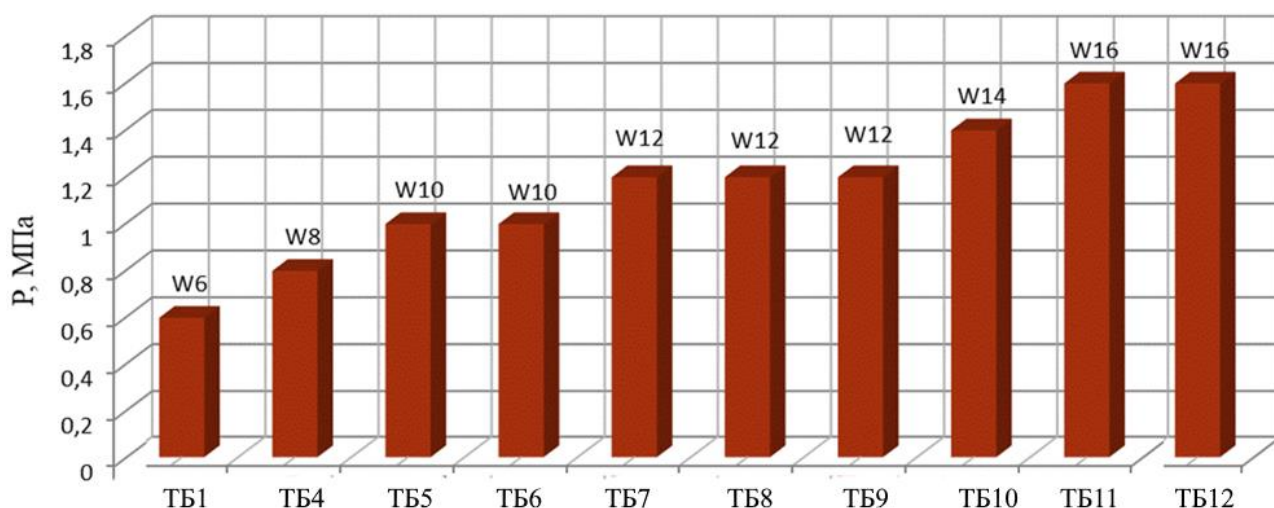


Рисунок 4.5 - Характеристики водонепроницаемости разработанных материалов

Установлено, что разработанные торкрет-бетоны способны эффективно выдерживать до 350 циклов замораживания-оттаивания (у контрольного состава 250 циклов) (рисунки 4.6-4.7).

	Прочность на сжатие, МПа	Марка	Прочность на сжатие после кол-ва циклов, МПа				Марка	Потеря массы, %	Причина прекращения испытаний
			250	300	350	400			
ТБ1 →	56,9	W6	54,3 -4,51%	48,6 -14,51%	-	-	F200	1,9	прочность
ТБ2 →	59,2	W6	59,0 -0,41%	57,5 -2,84%	-	-	F200	2,1	масса
ТБ3 →	58,1	W6	57,8 -0,52%	56,6 -2,63%	-	-	F200	2,1	масса
ТБ4 →	64,2	W8	60,3 -6,07%	58,7 -8,56%	52,3 -18,50%	-	F300	1,9	прочность
ТБ5 →	72,3	W10	70,5 -2,46%	66,8 -7,64%	-	-	F200	2,1	масса
ТБ6 →	68,8	W10	65,4 -5,01%	63,4 -7,82%	-	-	F200	2,2	масса
ТБ7 →	68,5	W12	65,5 -4,39%	63,5 -7,32%	62,8 -8,25%	-	F300	2,2	масса
ТБ8 →	73,5	W12	71,5 -2,77%	69,3 -5,69%	67,2 -8,56%	61,6 -16,11%	F300	1,8	прочность
ТБ9 →	72,3	W12	68,4 -5,39%	66,9 -7,47%	65,4 -9,58%	-	F300	2,1	масса
ТБ10 →	70,0	W14	65,5 -6,39%	64,3 -8,10%	63,0 -9,95%	-	F300	2,2	масса
ТБ11 →	74,4	W16	70,5 -5,23%	69,6 -6,50%	68,6 -7,85%	-	F300	2,3	масса
ТБ12 →	70,4	W16	66,7 -5,27%	65,0 -7,71%	64,7 -8,04%	63,9 -9,24%	F300	2,2	масса

Рисунок 4.6 - Характеристики долговечности торкрет-бетонов

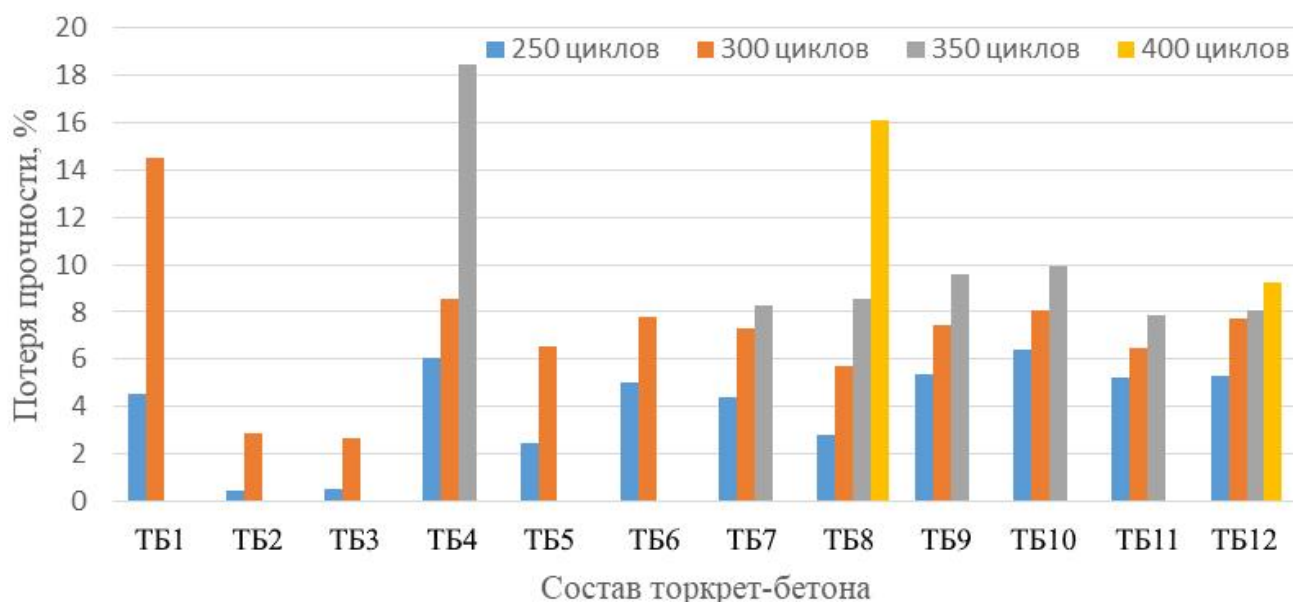


Рисунок 4.7 – Потеря прочности торкрет-бетонов при испытаниях на морозостойкость

На основании полученных экспериментальных данных, установлены статистические корреляции между прочностью на сжатие (на растяжение при изгибе) и коэффициентом фильтрации (рисунок 4.8).

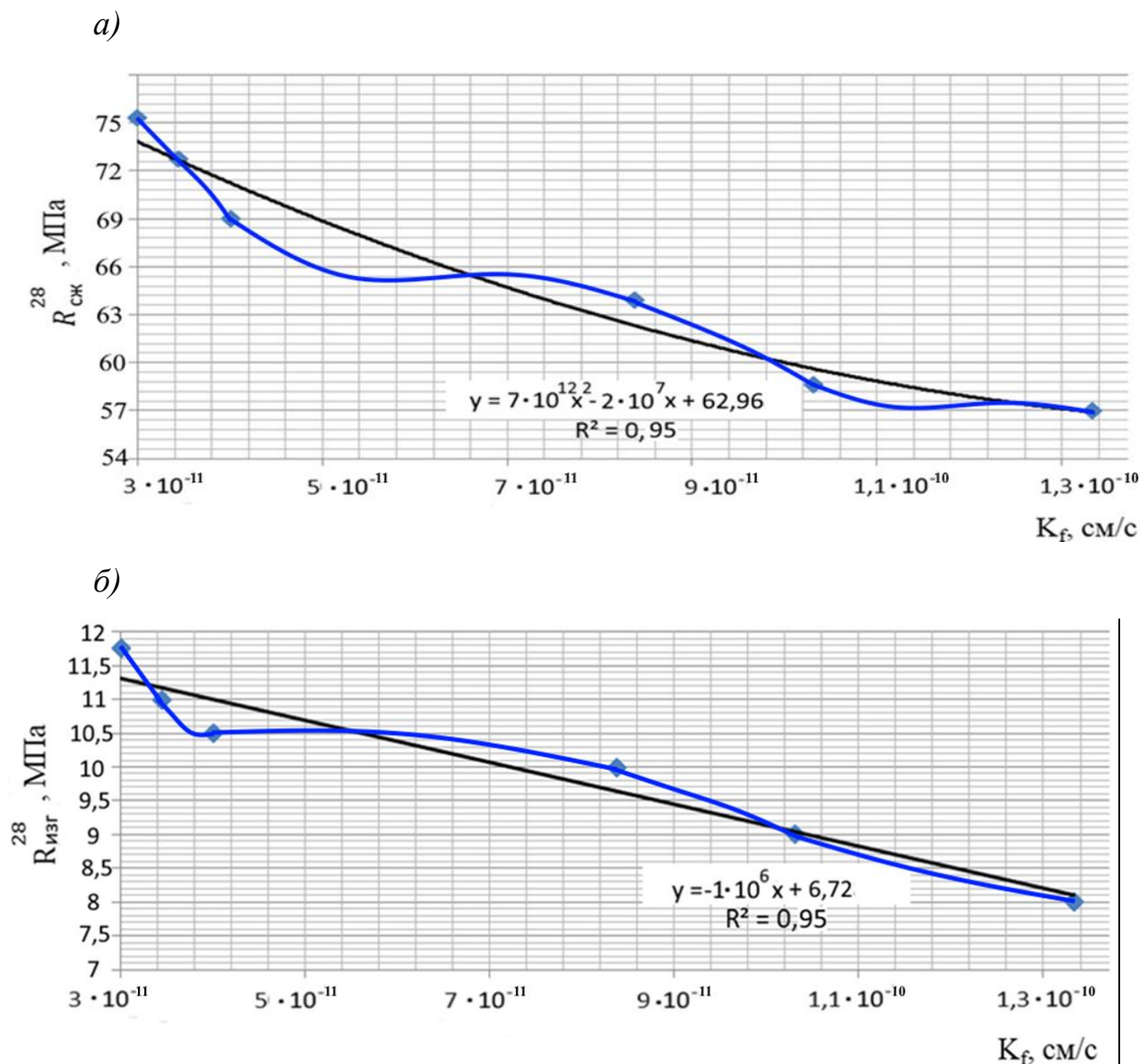


Рисунок 4.8 – Зависимость между прочностными свойствами торкрет-бетона и коэффициентом фильтрации K_f : а) при сжатии, б) при изгибе

Данный коэффициент K_f вычислялся путем деления объема воды Q_f , профильтровавшейся через образец за время τ , на изменение давления между гранями образца ($P - 0,1$ МПа), умноженному на динамическую вязкость воды μ при температуре 20°C ; ρ_w – плотность воды, $g = 9,8$ м/с², δ - расстояние между гранями образца: $K_f = (\mu \cdot \rho_w \cdot g \cdot \delta \cdot Q_f) / (P - 0,1) \cdot \tau$. Рост наличия АСС от 0 до 35 мас. % приводил к снижению K_f в 4 раза: с $1,3 \cdot 10^{-10}$ см/с до $0,3 \cdot 10^{-10}$ см/с. Зависимость

28-суточной прочности на сжатие и коэффициента фильтрации представляет собой полиномиальную функцию, а аналогичная зависимость для прочности на растяжение при изгибе является линейной. Статистический показатель R^2 является более выраженным для значений прочности на сжатие, чем на растяжение при изгибе.

Объем и размерность открытых капиллярных пор снижались с ростом наличия АСС до 35 мас. %, закономерно уменьшая значения фильтрации (рисунок 4.9). Это объясняется повышением скорости и полноты гидратации алита и трехкальциевого алюмината, и ростом объемного содержания гидросиликатного геля с формированием вторичных низкоосновных новообразований цементного камня.

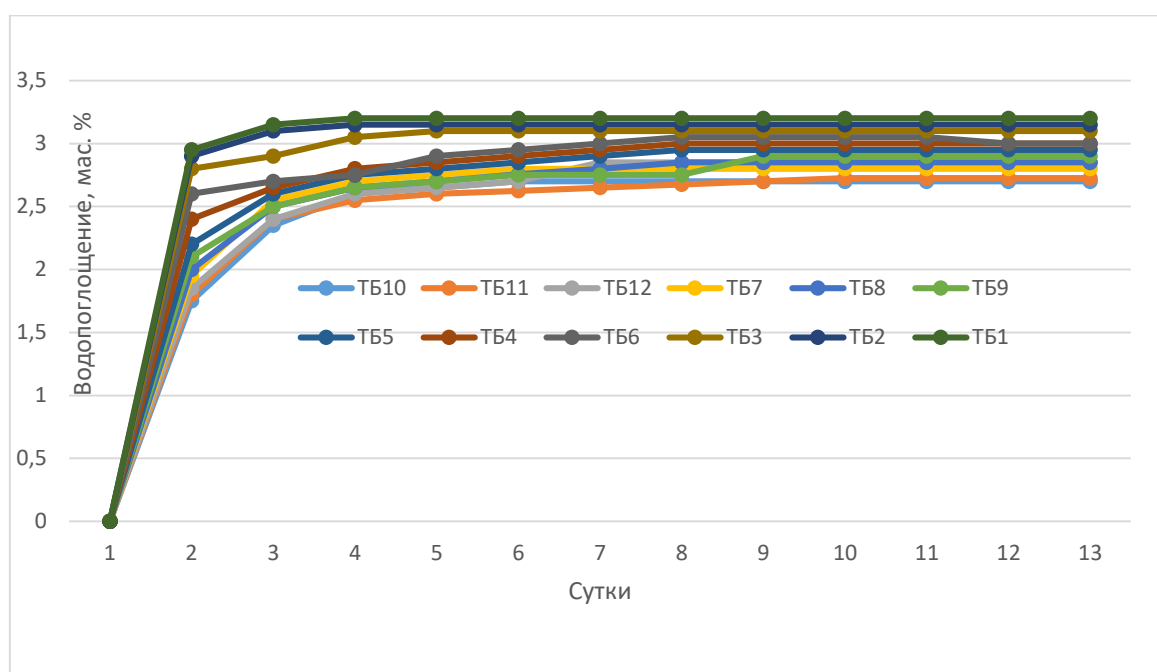


Рисунок 4.9 – Водопоглощение по массе торкрет-бетонов

Установлено снижение общего объема пор у модифицированного бетона с ростом наличия АСС до 35 мас. %. Характеристики пористой структуры λ и однородности пор α , определенные по результатам исследования кинетики водонасыщения $W_t(t)$ по ГОСТ 12730.4-2020, зависели от содержания АСС. Взаимосвязь этих показателей через значение максимального изменения массы образца W_{\max} по формуле $W_t(t) = W_{\max} \left[1 - e^{-\overline{(\lambda_1 t)}^\alpha} \right]$ приведена на рисунке 4.10.

Согласно данным, приведенным на рисунке 4.10, показатель средней размерности открытых капиллярных пор снижается до 4 раз, а показатель однородности размеров открытых капиллярных пор растет до 3 раз при повышении количества введенной алюмосиликатной составляющей, что приводит к снижению размерности пор и росту их однородности. Согласно классификации ГОСТ 12730.4-2020, разработанные материалы относятся к плотным ($W \leq 5\%$) и особо плотным ($5\% < W \leq 10\%$), микропористым ($\lambda \leq 0,5$), высокой однородности ($0,7\% < W \leq 1,0\%$).

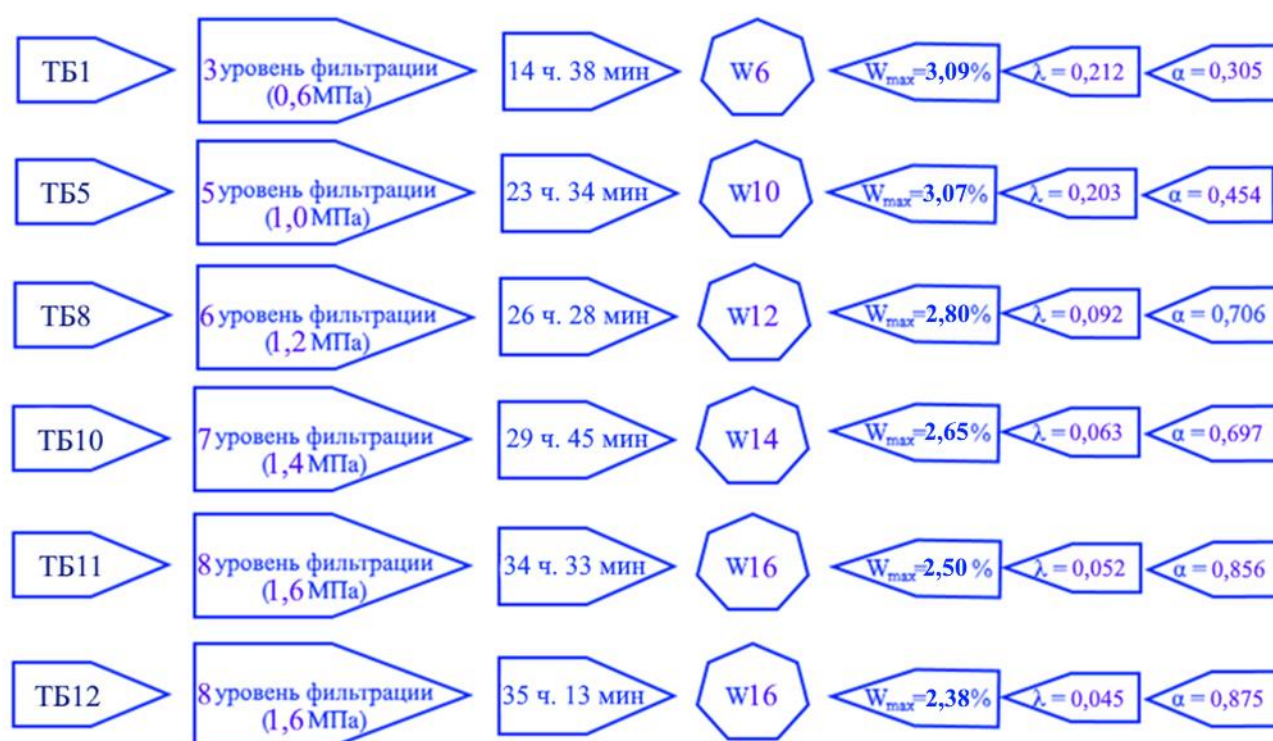


Рисунок 4.10 – Водонепроницаемость, водопоглощение и характеристики поровой структуры торкрет-бетонов

Относительные деформации образцов, обусловленные увеличением длины образцов 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.

Согласно классификации ГОСТ 25192-2012, полученные торкрет-бетоны являются цементными, конструкционными, эксплуатируемыми в среде без риска коррозионного воздействия, тяжелыми, на плотных заполнителях и с плотной

структурой, высокопрочными, твердеющими в естественных условиях, быстротвердеющими, обладающими высокой морозостойкостью и водонепроницаемостью.

Разработанные торкрет-бетоны соответствуют требованиям ТУ 5745-00116216892-06 (таблица 4.5).

Таким образом, разработанные составы торкрет-бетонов характеризуются маркой по водонепроницаемости W16 (у контрольного образца W6), маркой по морозостойкости F₁₃₀₀. При этом установлены хорошие корреляции между прочностными свойствами и коэффициентом фильтрации. При повышении количества введенной алюмосиликатной составляющей показатель пористой структуры снижается, а показатель однородности пор растет, что приводит к снижению размерности пор и росту их однородности.

Таблица 4.5 – Соответствие разработанных торкрет-бетонов

ТУ 5745-00116216892-06

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	≤10	0-1,5
Марка по водонепроницаемости	W6-W16	W4-W12
Марка по морозостойкости	F ₁₂₀₀ -F ₁₃₀₀	F50-F1000
Стойкость к сульфатной коррозии	сульфатостойкий	не нормируется
Отскок, мас. %	≤8	не нормируется

4.4. Использование торкрет-бетонов при усилении железобетонных конструкций зданий и сооружений

Использование торкрет-бетонов осуществлялось при укреплении железобетонной блочной стены подземного перехода в г. Владивостоке толщиной 200 мм разработанным материалом ТБ11 толщиной 60 мм (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 - Усиление несущей стены подземного перехода торкрет-бетоном

Первоначально проведено обследование степени износа стен подземного сооружения по разработанной методике. В результате установлено, что несущие стены из железобетонных блоков требуют усиления.

В процессе усиления конструкции использовалась арматурная сетка, которая по заданным параметрам, имела следующие характеристики:

- шаг поперечных и продольных стержней: 30 см и 20 см, соответственно;
- расстояние между арматурной сеткой и конструкцией: 1 см;
- диаметр продольных и поперечных стержней: 1 см;
- выступ верхней части анкера от арматуры: 1 см.

Таким образом, толщина защитного бетонного слоя составила 2 см, который служил для защиты арматуры от воздействия внешних факторов и обеспечения ее долговечности и надежности.

Для обеспечения надежной совместной работы усиленной стены диссертантом применены положения закона сродства структур, которые нашли практическое использование при проектировании торкрет-бетонных смесей. Для этого, в рациональный состав ТБ11 вводили 15% бетонного лома от массы вяжущего. Бетонный лом был взят из отслоившихся фрагментов усиливаемых железобетонных блоков с последующим совместным измельчением с компонентами композиционного цемента до $S_{уд} = 450 \text{ м}^2/\text{кг}$.

По результатам экспериментов (таблица 4.6), видно, что усиление стены привело к увеличению ее несущей способности вдвое - с 15,2 до 37,2 МПа. Это

достигается благодаря использованию ремонтного материала торкрет-бетона ТБ11, который обладает прочностью 74,4 МПа в марочном возрасте. Кроме того, контактная зона между ремонтным материалом и стеной уплотняется и упрочняется в соответствии с принципами закона сродства структур при проектировании ремонтных материалов, что привело к увеличению адгезии в 1,5 раза. Это позволяет повысить несущую способность стены более чем в 2 раза.

Упрочнение контактной зоны достигается путем использования закона сродства структур. Принцип закона сродства структур предусматривает формирование внутренней устойчивой связи между различными материалами, чтобы обеспечить определенные физико-механические и эксплуатационные требования всей конструкции. Контактная зона между материалами должна иметь сходство и близость по основным свойствам с матрицей материала, чтобы обеспечить совместную работу материалов, эффективную передачу нагрузок и устойчивость системы в целом. Это позволяет достичь более высокой прочности и долговечности усиленной конструкции [142]. Создание прочной контактной зоны с использованием закона сродства структур позволяет улучшить механические свойства и надежность соединения между старым и новым слоем бетона, где необходимо обеспечить хорошую адгезию и совместную работу между ними.

Таблица 4.6 - Результаты усиления стены железобетонного сооружения

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

Таким образом, установлена эффективность применения разработанных составов торкрет-бетонных смесей для укрепления несущих элементов железобетонных объектов с увеличением несущей способности вдвое. Высокая прочность созданного ремонтного состава объясняется использованием материалов с высокой прочностью, таких как торкрет-бетон ТБ11. Этот материал имеет прочность 74,4 МПа в марочном возрасте, что способствует увеличению

несущей способности усиленной конструкции. Однако, помимо самого материала, важную роль играет также плотная адгезионная контактная зона между базовым и наносимым слоями бетона. Применение положений закона сродства структур при проектировании ремонтных материалов позволяет достичь уплотнение и упрочнение этой контактной зоны. Это обеспечивает более эффективную передачу нагрузок между слоями и повышает устойчивость всей конструкции. Таким образом, высокая прочность ремонтного состава и уплотнение контактной зоны являются результатом использования материалов с высокой прочностью и применения принципов закона сродства структур при разработке ремонтных материалов, что привело к увеличению адгезии композита в 1,5 раза.

Внедрение было осуществлено при выполнении работ по усилению подвальных помещений в многоэтажных жилых домах г. Артеме по адресам: ул. Кирова, дома 150 и 152 (постройки 1967 г.). В геолого-литологическом строении участка ремонтируемых жилых домов принимают участие: насыпной (перемещенный) грунт; нерасчлененные делювиально-элювиальные грунты; скальные грунты. Насыпной (перемещенный) грунт распространен в пределах исследуемого участка повсеместно, слоем мощностью от 0,2 до 10,8 метров. Образован грунт в процессе производства планировочных работ и представлен механической смесью щебня, глыб, суглинка, супеси, отходов строительного производства. Грунт – слежавшийся. Нерасчлененные делювиально-элювиальные отложения слагают основную часть геолого-литологического разреза исследуемого участка и вскрыты скважинами под толщей насыпных грунтов.

Делювиально-элювиальные отложения подразделяются на:

- супесь твердую, с включением обломочного материала до 20%;
- суглинки полутвердые и твердые, с включением обломочного материала от 10 до 25%;
- щебенистый грунт, с супесчано-суглинистым заполнителем (10-25%).

Мощность слоя супеси изменяется от 0,6 до 5,8 м; мощность слоя суглинков изменяется от 0,6 до 11,7 м; мощность слоя щебенистого грунта

изменяется от 0,4 до 4,0 и более метров. Скальные грунты завершают разрез исследуемого участка. Вскрыты на глубинах от 0,6 до 19,5 м и представлены осадочными породами пермской системы поспеловской свиты - песчаниками, различной степени выветрелости, прочности и трещиноватости.

В ходе анализа технического состояния действующих городских подземных сооружений установлено, что стандартная стена из монолитной железобетонной смеси или сборного железобетона составляет 200 мм. Увеличивая толщину несущих стен торкрет-бетоном разработанного состава, достигаем повышения защитных свойств железобетонного сооружения от действия боковой сейсмозрывной волны с давлением во фронте 110 кПа. При том, что стандартные городские подземные сооружения рассчитаны на разрушение при давлении во фронте 70 кПа. (рисунок 4.12). Данный расчет был проведён в программной среде WebCAD.pro.

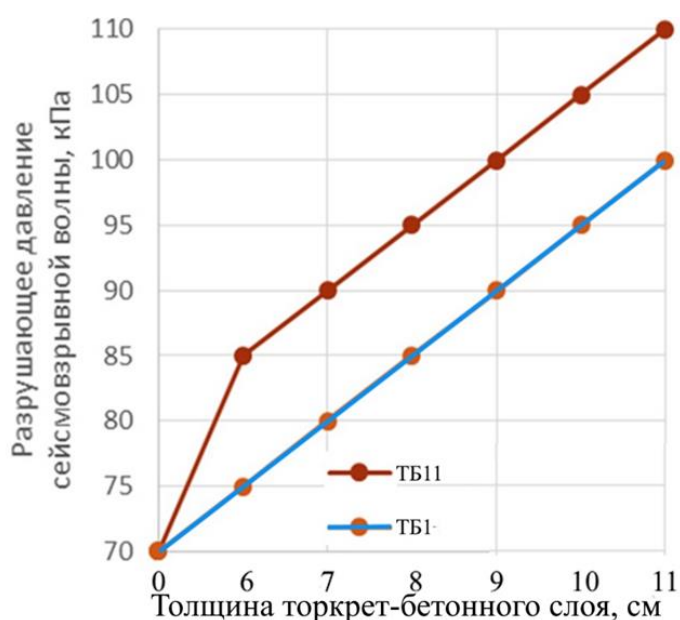


Рисунок 4.12 – Зависимость разрушающего избыточного давления от толщины материала

Установлено, что разработанный торкрет-бетон обладает высокой прочностью, устойчивостью к воздействию влаги и газов, а также отличной адгезией к основанию. Поэтому, применение торкрет-бетона для усиления железобетонных сооружений может значительно повысить их надежность и долговечность. Ремонт с использованием торкрет-бетона позволяет восстановить поврежденные или ослабленные участки конструкции, а также

улучшить их сопротивляемость воздействию внешних нагрузок. Это может включать усиление балок, столбов, плит, фундаментов и других элементов сооружения.

Таким образом, ремонт с применением разработанных материалов для торкрет-бетонного усиления конструкций позволяет подготовить существующие сооружения для продолжения их эффективной эксплуатации, увеличивая их прочность и долговечность.

4.5. Выводы

1. Использование разработанных торкрет-бетонов с толщиной ремонтного слоя около 6 см позволяет не только обеспечить необходимую степень усиления несущих элементов, но и эксплуатировать отремонтированные сооружения в качестве объектов двойного назначения.

2. Установлена эффективность применения разработанных составов торкрет-бетонных смесей для укрепления несущих элементов железобетонных объектов с увеличением несущей способности вдвое. Высокая прочность созданного ремонтного состава объясняется использованием материалов с высокой прочностью, таких как торкрет-бетон ТБ11. Этот материал имеет прочность 74,4 МПа в марочном возрасте, что способствует увеличению несущей способности усиленной конструкции. Высокая прочность ремонтного состава и уплотнение контактной зоны являются результатом использования материалов с высокой прочностью и применения принципов закона сродства структур при разработке ремонтных материалов, что привело к увеличению адгезии композита в 1,5 раза.

3. Разработанные составы торкрет-бетонов характеризуются маркой по водонепроницаемости W16 (у контрольного образца W6), маркой по морозостойкости F₁₃₀₀. При этом установлены хорошие корреляции между прочностными свойствами и коэффициентом фильтрации. При повышении количества введенной алюмосиликатной составляющей показатель средней

размерности открытых капиллярных пор снижается до 4 раз, а показатель однородности размеров открытых капиллярных пор растет до 3 раз.

4. Разработанные торкрет-бетоны способны выдержать на 280% большее число ударов до начала трещинообразования и на 584% число ударов до потери структурной целостности образца.

5. Ремонт с применением разработанных материалов для торкрет-бетонного усиления конструкций позволяет подготовить существующие сооружения для восстановления характеристик, необходимых для их эффективной эксплуатации, увеличивая их прочность и долговечность.

6. Ремонт с применением разработанных материалов для торкрет-бетонного усиления конструкций позволяет подготовить существующие сооружения для продолжения их эффективной эксплуатации, увеличивая их прочность и долговечность. В частности, достигнуто повышение защитных свойств железобетонного сооружения от действия боковой сейсмозрывной волны с давлением во фронте 110 кПа, при том, что стандартные городские подземные сооружения рассчитаны на разрушение при давлении во фронте 70 кПа.

5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВО

5.1 Технико-экономическая эффективность обогащения золошлаковых смесей с целью извлечения алюмосиликатной составляющей

Разработанная технология обогащения золошлаковой смеси с целью получения АСС является рентабельной, как в лабораторных, так и в промышленных условиях, что подтверждается результатами, приведенными в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Мощность и производительность применяемого оборудования

Технологический процесс	Лабораторное оборудование	Промышленное оборудование
Флотация	Механическая флотационная машина SF-0.37, 2,1 кВт, 24 м ³ /ч	
Магнитная сепарация	Мокрый магнитный сепаратор ПБМ-П-25-10, 0,25 кВт, 0,05 м ³ /ч	Магнитный барабанный сепаратор на постоянных магнитах СТВУ1018, 5,5 кВт, 35 м ³ /ч
Итого: энергозатраты на 1 м ³ (с учетом транспортировки, дезинтеграции и сушки)	59,2 кВт-ч	48,4 кВт-ч
Итого: производительность	0,05 м ³ /ч	24 м ³ /ч

Из таблицы 5.1 видно, что основные затраты при производстве алюмосиликатного компонента приходятся на температурную обработку. Аналогично, при производстве кубометра цемента также несколько тысяч киловатт-часов расходуются на обжиг сырьевой смеси в процессе получения клинкера, как это представлено на рисунке 5.1.

Сравнивая таблицу 5.1 и рисунок 5.1, приходим к выводу, что энергозатраты на производство алюмосиликатной составляющей в 2 раза ниже (120 кВт-ч / 50 кВт-ч; без учета обжига), чем для портландцемента. Это является важным достижением, потому что цементная промышленность является третьей по энергетической ёмкости после предприятий топливно-энергетического комплекса и производства металлов.



Рисунок 5.1 – Энергозатраты на производство 1 кубометра портландцемента

В результате 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.

Для внедрения разработанных алюмосиликатов в качестве минеральных добавок в композиционные цементы был открыт производственный цех на базе ООО «Артемспецстрой» по обогащению золошлаковой смеси с годовой производительностью 10 000 тонн (Приложение А).

Важность применения вторичных ресурсов подтверждается вступившим в силу 1 марта 2024 г. распоряжением Правительства РФ № 2094-р от 2023 г.

Таким образом, энергозатраты на производство алюмосиликатной составляющей в 2 раза ниже (120 кВт-ч / 50 кВт-ч; без учета обжига), чем для портландцемента.

5.2 Техничко-экономическое обоснование перспективности производства и применения торкрет-бетонов на композиционных цементах

Создание и использование композиционных цементов дает возможность минимизировать последствия сопутствующих проблем, характерных цементной индустрии: энергетическая емкость и высокая стоимость строительной продукции, масштабные выбросы в атмосферу, нехватка сырьевых ресурсов в некоторых регионах страны. Отдельным проблемным вопросом стоит выделить моральную и техническую изношенность ряда действующих организаций отечественной строительной индустрии; проведение технической реновации требует привлечение значительных капиталовложений.

Исходя из этих предпосылок, использование композиционных цементов техногенного происхождения с одновременной утилизацией многотоннажных отходов является экономически эффективным и экологически безопасным.

Экономическая эффективность разработанных торкрет-бетонов подтверждается расчетом себестоимости в сравнении с изготовлением одного кубического метра традиционной бетонной смеси плотностью 2200 кг/м³ по следующей формуле:

$$\text{Э}_{\text{год}} = (C_1 - C_2) \times V - C_{\text{НИР}} \quad (5.1)$$

здесь C_1 и C_2 характеризует базовые затраты на изготовление одного кубического метра традиционной смеси (руб.) и проектную стоимость такого же объема разработанного материала, соответственно;

V - годовой объем производственной линии, м³;

$C_{\text{НИР}}$ – затраты на проведение научных исследований, руб.:

$$C_{\text{НИР}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц.н}} + C_{\text{экс}} + C_{\text{нт}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{нак}} + C_{\text{кон}} \quad (5.2)$$

здесь $C_{\text{мат}}$ характеризует вложение в приобретение материалов, необходимых для осуществления научных исследований, руб.

$C_{\text{зп}}$ – зарплата научных работников, задействованных в исследовании, руб.:

$$C_{\text{зп}} = \sum_{i=1}^x \text{ч}_i \times \text{З}_{\text{ст}i} \times T_{\text{НИР}} \left(1 + \frac{x}{100}\right) \quad (5.3)$$

здесь $ч_i$ – число этих работников, чел; данные исследования проводил один диссертант;

$З_{стi}$ – оклад научного работника, руб. С 1 января 2023 г. минимальный размер оплаты труда составил 16 242 рублей в месяц;

$T_{НИР}$ - срок проведения научных исследований, мес. (36 мес.);

x – доплата к тарифному фонду, % ; в диссертации принято $x = 70\%$.

$$C_{зн} = 1 \times 16\,242 \times 36 \times (1 + 0,7) = 994\,010 \text{ руб.}$$

$C_{соц.н.}$ характеризуют отчисления от заработной платы на соц. нужды, руб.

$$C_{соц.н.} = C_{зн} \times Y \quad (5.4)$$

где $Y = 30\%$ – непосредственно отчисления на соц. нужды.

$$C_{соц.н.} = 994\,010 \times 0,3 = 298\,203 \text{ руб.}$$

$C_{экс}$ представляют затраты на эксплуатацию лабораторного оборудования, необходимого для эффективного проведения научно-исследовательской работы, руб.

$$C_{экс} = C_a + C_p + C_{эн} + C_{ЭВМ} \quad (5.5)$$

здесь C_a – затраты на амортизацию лабораторных установок;

$$C_a = K \times Ц_{об} \times T_{эксн} / T_{норм} \quad (5.6)$$

K – норма амортизации лабораторного оборудования, 6%;

$Ц_{об}$ – стоимость этого оборудования.

В ходе проведения научно-исследовательской работы применялся лабораторный гидравлический пресс Shimadzu остаточной стоимостью 501 366 руб.

$T_{эксн}$ – продолжительность использования лабораторных установок:

$$T_{эксн} = n_{обр} \times T_{исп} = 195 \text{ обр.} \times 0,21 \text{ ч.} = 41 \text{ час.}$$

$T_{норм}$ – нормативный срок безаварийной эксплуатации, равный 20 тыс. ч.

$$C_a = 0,06 \times 501\,366 \times 41 / 20\,000 = 62 \text{ руб.}$$

C_p – затраты на текущий ремонт лабораторных установок; в текущем исследовании ремонта не проводилось, поэтому:

$$C_p = 0 \text{ руб.}$$

$C_{эн}$ – затраты на энергию, требующуюся для эффективного осуществления НИР, руб.

$$C_{эн} = N \times T_{эф.м} \times Ц_{эн} \quad (5.7)$$

здесь N – мощность лабораторных установок, кВт;

$T_{эф.м}$ – продолжительность работы лабораторных установок, применявшихся в научном исследовании, маш.-ч;

$Ц_{эн}$ – тариф за 1 киловатт-час электроэнергии для промышленных предприятий в Приморском крае (6,06 руб.).

Стоимость сырья и тарифы на электрическую энергию приняты по общедоступным интернетовским сайтам и прайс-листам организаций строительной индустрии.

Рисунок 5.2 суммирует затраты на электрическую энергию.

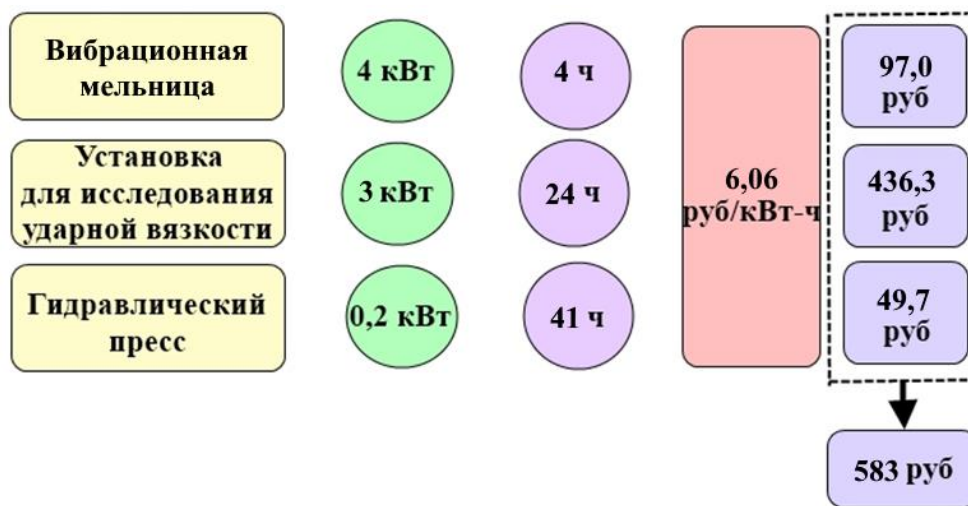


Рисунок 5.2 – Расчет затрат на электроэнергию

$C_{ЭВМ}$ характеризует затраты на использование компьютерной техники;

$$C_{ЭВМ} = T_{ф} \times Ц_{ЭВМ} \quad (5.8)$$

где $T_{ф}$ – продолжительность работы, маш.-ч.

$Ц_{ЭВМ}$ – стоимость часа эксплуатации компьютеров, применявшихся в научном исследовании, руб.

$$C_{ЭВМ} = 84 \times 32 = 2688 \text{ руб.}$$

$$C_{экс} = 62 + 583 + 2688 = 3333 \text{ руб.}$$

$C_{нт}$ – затраты на поиск информации (0 руб.);

$C_{ком}$ – командировочные расходы (0 руб.).

Накладные расходы $C_{нак}$ составляет десять процентов от прямых затрат.

Рисунок 5.3 суммирует затраты на осуществление научной работы.



Рисунок 5.3 – Расчет затрат на осуществление научной работы

Согласно сводным данным, приведенным на рисунке 5.3, затраты на осуществление научной работы составили 1 424 101 руб. Сравним экономическую эффективность разработанных материалов. Расход материалов на 1 тонну композиционных цементов рациональных составов для торкрет-бетона приведен в таблицах 5.2-5.3.

Таблица 5.2 – Расход затрат на 1 тонну КЦ-35

Затраты	Расход	Стоимость единицы продукции, руб.	Затраты, руб.
Клинкер, т	0,625	6150	3844
Алюмосиликатная составляющая, т	0,325	-	-
Гипс, т	0,05	3060	153
		ИТОГО	3997
Электроэнергия, кВт-ч	61	6,06	370
		ИТОГО	4367

Согласно сводным данным, приведенным в таблицах 5.2-5.3, затраты на материалы и электроэнергию для изготовления 1 тонны КЦ рациональных

составов варьируются в пределах 3752 - 4367 руб. Для сравнения, предприятия строительной индустрии Приморского края, изготавливающие бетон, закупают оптом портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н по цене 8004 руб. за тонну. Важным является то, что изготовление композиционного цемента осуществимо, как на новом производстве, так и на промышленных мощностях действующего завода. В последнем случае, значительно снижаются затраты на изготовление КЦ, что повышает экономическую эффективность производства.

Таблица 5.3 – Расход затрат на 1 тонну КЦ-45

Затраты	Расход	Стоимость единицы продукции, руб.	Затраты, руб.
Клинкер, т	0,525	6150	3229
Алюмосиликатная составляющая, т	0,425	-	-
Гипс, т	0,05	3060	153
		ИТОГО	3382
Электроэнергия, кВт-ч	61	6,06	370
		ИТОГО	3752

На рисунке 5.4 рассчитаны затраты на изготовление одного кубического метра торкрет-бетона на базе разработанных композиционных цементов.

Статья затрат	Норма расхода на 1м ³ торкрет-бетона, единиц	Цена за единицу продукции, руб.	Стоимость на 1 м ³ торкрет-бетона, руб.
Композиционный цемент, кг	450	4,367	1965
Суперпластификатор, кг	3,375	190	641
Гранитный отсев, кг	1350	1,81	2443
Вода, л	157,5	0,031	5
ИТОГО стоимость сырья			5 054 руб.
Электроэнергия, Квт-ч	76	6,06	461
ИТОГО затраты			5 515 руб.

Рисунок 5.4 – Расчет затрат на изготовление одного кубического метра торкрет-бетона

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.).

Сравнение разработанных материалов проводилось с одним кубическим метром традиционной бетонной смеси тяжелого бетона В45П4F₁200W12 средней стоимостью на предприятиях строительной индустрии Приморского края 7344 руб., соответственно.

Результаты расчета при условии производства 25 тысяч кубических метров бетонной смеси в год подтверждают значительную экономическую эффективность материалов:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = (7344 - 5515) \cdot 25\,000 - 1\,424\,101 = 44\,300\,899 \text{ руб. (для торкрет-бетона).}$$

Таким образом, анализ технико-экономической эффективности изготовления торкрет-бетона на базе разработанного композиционного цемента подтверждает перспективность широкомасштабного внедрения результатов диссертации. Утилизация отходов теплоэлектроэнергетических предприятий при производстве строительных материалов дает возможность применять обогащенные техногенные ресурсы безвозмездно. Более того, экономя на экологических сборах при освобождении золоотвалов, появляется возможность еще и зарабатывать на утилизации отходов ТЭЦ, что еще больше снижает стоимость разработанного материала. Попутно решается задача повышения экологической безопасности среды жизнедеятельности человека за счет снижения цементоемкости и повышения утилизации техногенных отходов.

5.3. Техничко-экономическая эффективность применения торкрет-бетонов

Величина затрат оценивалась в расчете на 1 м² стен в зависимости от их характеристик и вместимости сооружения.

Применение разработанных составов торкрет-бетона позволяет сократить стоимость материалов за счет замещения дорогостоящего цемента композиционным материалом на основе молотых совместно клинкера и обогащенной золошлаковой смеси. В частности, стоимость 1 м³ торкрет-бетона

составляет 5515 руб., а среднерыночная цена традиционного бетона для г. Владивостока составляет 7344 руб.

Затраты на устройство торкрет-бетонных слоев различной толщины для сооружений различной вместимости приведены на рисунке 5.5.

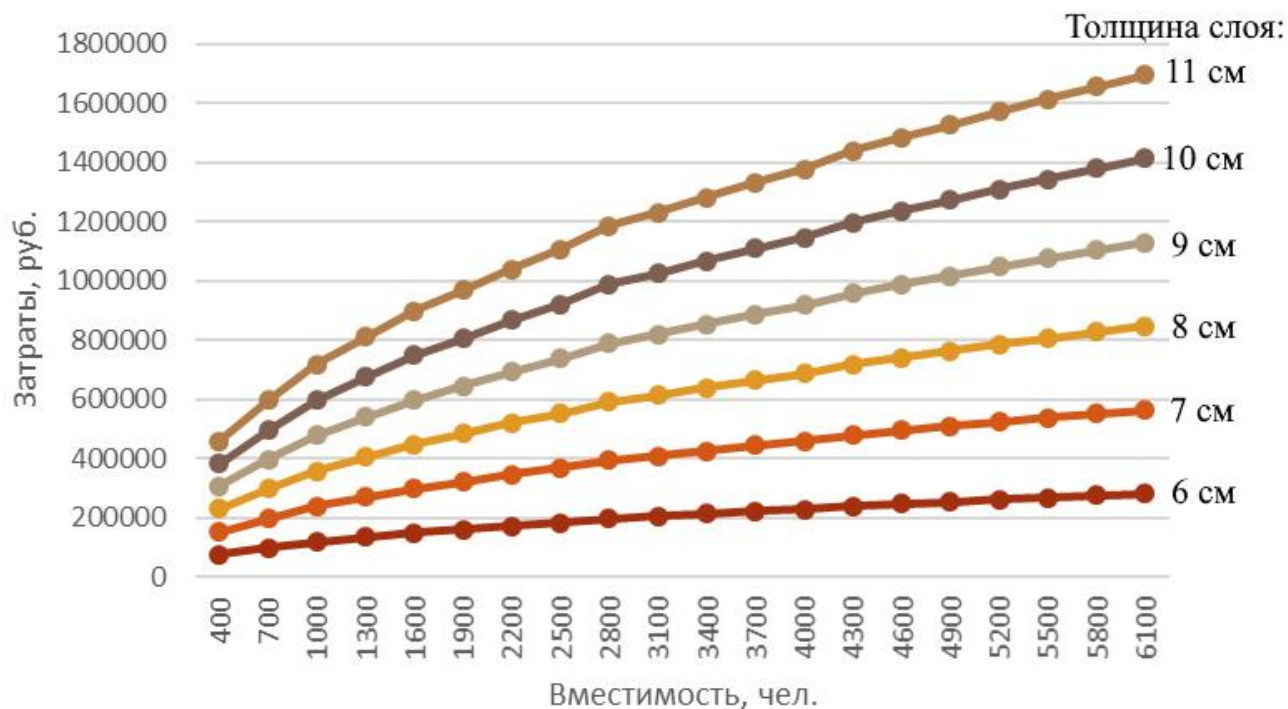


Рисунок 5.5 – Затраты на устройство торкрет-бетонного усиления стен для сооружений различной вместимости

Средняя стоимость нового строительства для Приморского края составляет 45,7 тыс. руб. за 1 м². На рисунке 5.6 приведены затраты на новое строительство подземных сооружений, соответствующих требованиям ГО и ЧС.

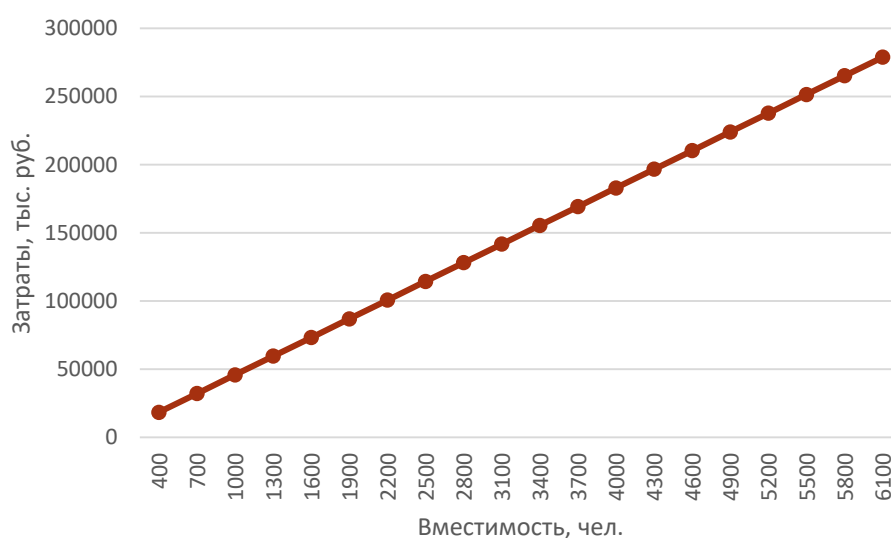


Рисунок 5.6 – Затраты на новое строительство подземных сооружений

Таким образом, сравнивая рисунки 5.5-5.6, отмечаем, что применение разработанных строительных материалов для торкрет-бетонного усиления стен позволит осуществлять ремонт железобетонных зданий и сооружений, позволяющий обеспечить быстрое и надежное восстановление существующих объектов, что является на порядок более экономически выгодным по сравнению с новым строительством.

5.4. Разработка и внедрение технологии изготовления композиционных цементов и торкрет-бетонов на его основе

Разработка и внедрение технологии изготовления КЦ и торкрет-бетона включает в себя этапы, приведенные на рисунке 5.7.

Разработанная технология базируется на традиционном промышленном процессе производства бетонной смеси и строительных изделий на ее основе, с некоторым дополнением технологической линии. Составы композиционного цемента перечислены в 3 главе, а материалы на его основе - в 4 главе. Детальная модернизированная технологическая схема приведена на рисунке 5.7.



Рисунок 5.7 - Этапы производства композиционного цемента и торкрет-бетона

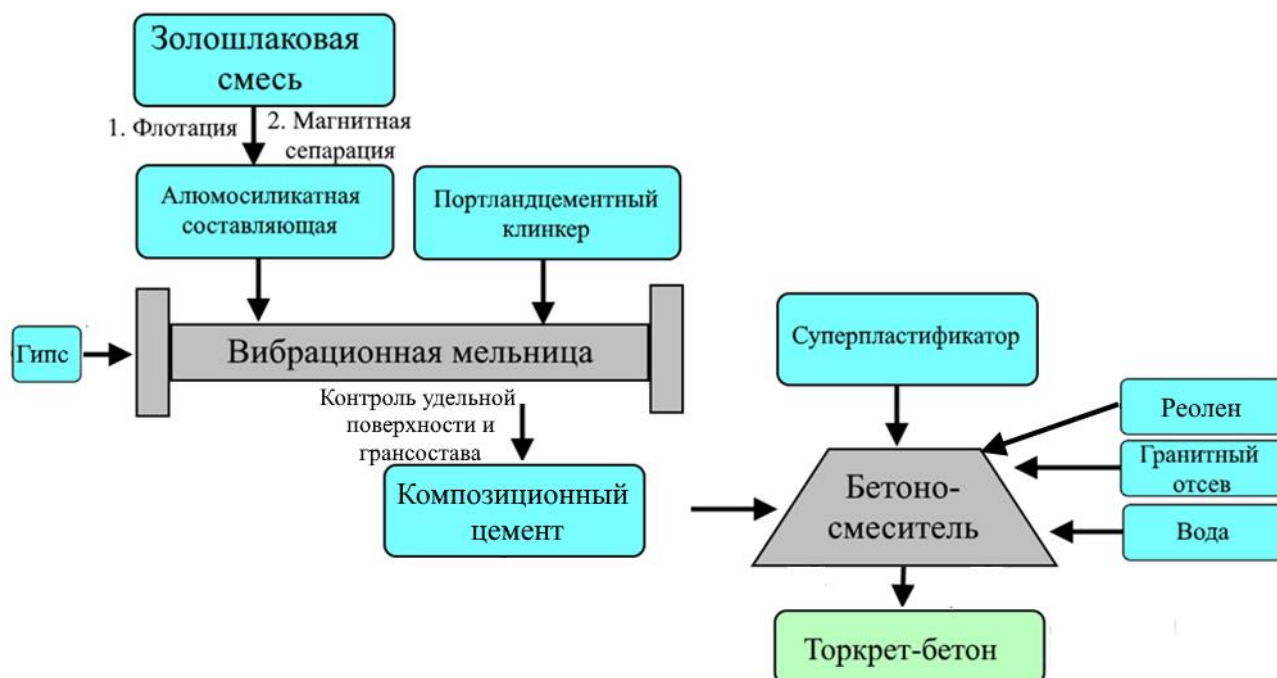


Рисунок 5.8 – Технологическая схема производства композиционного цемента и торкрет-бетона

Апробация разработанных рецептов и технологии производства разработанных материалов осуществлена на промышленных мощностях ООО «Артемспецстрой». Выпущена пробная партия торкрет-бетонных смесей объемом 15 м³ на КЦ с удельной поверхностью 450 м²/кг.

Производство материалов осуществлялось в следующей последовательности. Сначала сырье доставлялось в производственный цех грузовым автотранспортом. Весовыми дозаторами портландцементный клинкер, двухводный гипс и заранее изготовленная алюмосиликатная составляющая (путем флотации при 1700 об/мин в течение 7 мин и мокрой магнитной сепарации в противоточном режиме в течение 5 мин с напряженностью магнитного поля 0,5 Тл) подается в вибрационный помольный агрегат, способный обеспечить совместное действие ударных и центробежных усилий. Продолжительность измельчения компонентов композиционного цемента зависит от мощности, типа и габаритных размеров мельницы. Проведенная в результате такого помола механоактивация позволяет значительно улучшить физико-механические свойства КЦ и эксплуатационные характеристики материалов на его основе. Суперпластификатор вводится с водой затворения; на

том же этапе в бетоносмеситель подается отсев дробления гранитного щебня в качестве мелкого заполнителя.

Торкрет-бетон на основе композиционного цемента в заводских условиях производится путем отдозирования полученного КЦ в бетоносмеситель с добавлением жидкой смеси (вода затворения + СП+реолен) и полифракционного заполнителя (отсева дробления гранитного щебня) с модулем крупности 2,7, отмеренных при помощи весовых дозаторов, что обеспечивает равномерное распределение всех составляющих. Водовязущее отношение торкрет-бетонов составляло 0,3-0,4.

Технология торкрет-бетонирования включает в себя предварительный просев на сите с ячейкой 5 мм перед поступлением в нагнетательную установку (рисунок 5.9 а), где под давлением до 2,5 кгс/см² (рисунок 5.9 б) происходит процесс нанесения торкрет-бетона на конструкцию.

Дозирование всех составляющих бетонных смесей необходимо проводить с высокой точностью. Рациональное время смешивания компонентов в бетоносмесительной установке варьируется в диапазоне от 4 до 8 минут в зависимости от наполнения. После производства смесь должна подвергаться контролю качества перед отпуском готовой продукции.



Рисунок 5.9 – Элементы технологии торкрет-бетонирования: а) предварительный просев на сите с ячейкой 5 мм; б) манометр с рабочим давлением 2,5 кгс/см² (0,25 МПа)

Исходя из вышеизложенного, разработанная модификация технологической линии изготовления композиционного цемента, а также торкрет-бетона на его основе не влечет за собой значительного переоборудования предприятий строительной индустрии.

С целью широкомасштабного внедрения диссертационных результатов создан комплект нормативно-технической документации (приложение Б):

1. Стандарт организации «Композиционный цемент» (рисунок 5.10).



Рисунок 5.10 – Структура разработанного стандарта организации

2. Технологический регламент на производство торкрет-бетона (рисунок 5.11).



Рисунок 5.11 – Структура разработанного технологического регламента на производство торкрет-бетона

Данные регламентирующие документы были утверждены генеральным директором ООО «Артемспецстрой» (г. Артем Приморского края) и эффективно внедрены ООО «Артемспецстрой» и ООО «Специализированный застройщик «УНР 2020»»:

1. Торкрет-бетоны внедрены при выполнении работ по усилению 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 (постройки 1980 г.). Достигнутый эффект подтверждается тем, что технические характеристики подземных сооружений

соответствуют требованиям СП 88.13330.2014 «Защитные сооружения гражданской обороны». Детальные результаты приведены в следующей подглаве, а соответствующие акты внедрения - в приложении А.

2. Торкрет-бетоны внедрены 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).

3. ООО Специализированный застройщик «Патрокл» заинтересовано в приобретении торкрет-бетонов, разработанных при подготовке диссертации, для применения их при ремонте подземных сооружений в г. Владивостоке. Ремонт планируется в 2023-2024 годах с годовой потребностью 10000 м³ торкрет-бетонной смеси.

4. После недавнего землетрясения в Турции в феврале 2023 г. в адрес диссертанта 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-бетонов.

Применение результатов диссертационного исследования нашло отражение при выполнении работ по усилению подвальных помещений в многоэтажных жилых домах г. Артеме по адресам: ул. Кирова, дома 150 и 152 (постройки 1980 г.).

Исследуемая территория расположена в южной части Приморского края, где преобладает низкогорный, сильно расчлененный рельеф. Наиболее высокие вершины протянулись неширокой полосой с юго-запада на северо-восток, образуя водораздельный хребет между бассейнами рек, впадающих в Амурский и Уссурийский заливы. Рельеф на участке – предгорный (спланированный), с углами наклона земной поверхности до 6°.

В геолого-литологическом строении участка, предназначенного для размещения эксплуатируемых жилых домов, принимают участие: насыпной

(перемещенный) грунт; нерасчлененные делювиально-элювиальные грунты; скальные грунты.

Нерасчлененные делювиально-элювиальные отложения слагают основную часть геолого-литологического разреза исследуемого участка и вскрыты скважинами под толщей насыпных грунтов.

Делювиально-элювиальные отложения подразделяются на:

- супесь твердую, с включением обломочного материала до 20 %;
- суглинки полутвердые и твердые, с включением обломочного материала от 10 до 25 %;
- щебенистый грунт, с супесчано-суглинистым заполнителем в количестве от 10 до 25%.

Мощность слоя супеси изменяется от 0,6 до 5,8 метров; мощность слоя суглинков изменяется от 0,6 до 11,7 метров; мощность слоя щебенистого грунта изменяется от 0,4 до 4,0 и более метров.

Скальные грунты завершают разрез исследуемого участка. Вскрыты на глубинах от 0,6 до 19,5 метров и представлены осадочными породами пермской системы поспеловской свиты - песчаниками, различной степени выветрелости, прочности и трещиноватости.

К опасным геологическим и инженерно-геологическим процессам и явлениям относятся землетрясения любого генезиса, при сейсмичности района равной 6 баллов.

Достигнутый эффект после выполнения комплекса ремонтных работ подтверждается тем, что технические характеристики подземных сооружений соответствуют требованиям СП 88.13330.2014 «Защитные сооружения гражданской обороны». Акт внедрения выполненных работ приведен в приложении А.

Теоретические и практические положения диссертации используются в учебном процессе при подготовке специалистов по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», а также бакалавров и магистров по направлению подготовки 08.03.01 и 08.04.01 «Строительство»

(профиль «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций») в ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет».

Таким образом, разработанная модификация технологической линии производства композиционного цемента, а также торкрет-бетона на его базе имеет большие перспективы для широкомасштабного внедрения результатов исследования на действующих предприятиях строительной индустрии.

5.5. Выводы

1. Энергозатраты на производство алюмосиликатной составляющей в 2 раза ниже, чем для портландцемента. Это является важным достижением, потому что цементная промышленность является третьей по энергетической ёмкости после предприятий топливно-энергетического комплекса и производства металлов.

2. Анализ технико-экономической эффективности изготовления торкрет-бетона на базе разработанного композиционного цемента подтверждает перспективность широкомасштабного внедрения результатов диссертации. Утилизация техногенных отходов при производстве строительных материалов дает возможность применять обогащенные отходы теплоэлектроэнергетических предприятий безвозмездно. Более того, экономя на экологических сборах при освобождении золоотвалов, появляется возможность еще и зарабатывать на утилизации отходов ТЭЦ, что еще больше снижает стоимость разработанного материала. Попутно решается задача повышения экологической безопасности среды жизнедеятельности человека за счет снижения цементоемкости и повышения утилизации техногенных отходов.

3. Результаты расчета при условии производства 25 тысяч кубических метров бетонной (растворной) смеси в год подтверждают значительную экономическую эффективность материалов - 44 млн. руб. для торкрет-бетона.

4. Применение разработанных ремонтных материалов при укреплении действующих сооружений оказывается на порядок более экономически выгодным по сравнению с новым строительством.

5. Разработанная модификация технологической линии производства композиционного цемента, а также торкрет-бетона на его базе имеет большие перспективы для широкомасштабного внедрения результатов исследования на действующих предприятиях строительной индустрии.

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 повторного использования материалов от разборки зданий и сооружений), активированных и гомогенизированных в вибрационной мельнице, которое позволяет управлять процессами структурообразования за счет сродства структур и формирования высоко-прочных 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Города-миллионники России на 2021 год [Электронный ресурс]. Адрес доступа: <https://runetmir.com/goroda-millionniki-rossii> (дата обращения 23.12.2023)
2. Толстова, Е.М. Мегалополис и городская среда. преимущества и недостатки мегалополиса / Е.М. Толстова // Аллея науки. - 2018. - Т. 3. № 10 (26). - С. 51-54.
3. Экология крупного города (на примере Москвы): учеб. пособ.; под общей ред. А.Л. Минина. - М.: Изд-во «ПАСЬВА», 2001. - 192 с.
4. Пивоваров, Ю.Л. Основы геоурбанистики: Урбанизация и городские системы: учеб. пособ. / Ю.Л. Пивоваров - М.: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 1999. - 232 с.
5. Abbott, C. City Planning: A Very Short Introduction / C. Abbott. - Oxford University Press. – 232 p.
6. Боголюбов, В.С. Актуальные проблемы крупных городов / В.С. Боголюбов. - СПб: СПбГИЭА, 1997. - 194 с.
7. Конюхов, Д.С. Использование подземного пространства / Д.С. Конюхов. - М.: Архитектура-С, 2004. - 296 с.
8. Мостков, В.М. Подземные сооружения / В.М. Мостков. - М.: Изд-во МГСУ, 1998.
9. Слукин, В.М. Архитектурно-исторические подземные сооружения (типология, функция, генезис). - Свердловск: Изд-во Уральского университета, 1991. - С.236.
10. Dwight, H.G. Constantinople and Istanbul Old and New / H.G. Dwight. - London, 2002. - 256 p.
11. Jackson, H.E. Ancient Peoples and Landscapes / H.E. Jackson, E. Johnson // American Antiquity. - 1996. 61(4):802. DOI: 10.2307/282024
12. Толочко, П.П. Тайны киевских подземелий / П.П. Толочко. - Киев: Наук. думка, 1971.

13. Слукин, В.М. Тайны уральских подземелий / В.М. Слукин. - Свердловск: Кн. изд-во Сред-Урал., 1988.
14. Yun, B. Underground Engineering. Planning, Design, Construction and Operation of the Underground Space / B. Yun. - Shanghai, 2019. – 234 p.
15. Besner, J. Underground space needs an interdisciplinary approach / J. Besner // Tunnelling and Underground Space Technology. - 2016. - Vol. 55. - p. 224-228
16. Келемен, Я. Город под землей / Я. Келемен, З. Вайда. - М: Стройиздат, 1985.
17. Почему возник дефицит бомбоубежищ в России [Электронный ресурс]. Адрес доступа: <https://newizv.ru/news/society/28-11-2017/spasutsya-ne-vse-pochemu-voznik-defitsit-bomboubezhisch-v-rossii> (дата обращения 23.12.2023)
18. Соловьёв, В.Г. Анализ дефектов и повреждений железобетонных конструкций, характерных для подземных сооружений, на примере защитных сооружений гражданской обороны / В.Г. Соловьёв, Е.А. Шувалова, А.Ю. Орехова, А.А. Тюрина // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 1 (28). С. 124-133.
19. Репринцев, В.А. Пути восстановления и усиления защитных свойств защитных сооружений гражданской обороны на основе применения новых конструкционных материалов / В.А. Репринцев, И.В. Треушков, А.Л. Литвин // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. - 2021. - № 1 (48). - С. 39-46.
20. Мачнев, С.А. Методика оценки параметров воздействия на подземное защитное сооружение обычных средств поражения с управляемым прониканием / С.А. Мачнев, П.А. Путилин, А.В. Федоренко, А.М. Шевчук / Военный инженер. - 2022. - № 1 (23). - С. 26-33.
21. В Казани имеется 345 защитных сооружений [Электронный ресурс]. Адрес доступа: <https://kazan.bezformata.com/listnews/imeetsya-345-zashitnih-sooruzhenij/72787110/> (дата обращения: 14.01.2023)
22. Более 500 убежищ насчитывается в Нижнем Новгороде [Электронный ресурс]. Адрес доступа:

https://www.vremyan.ru/news/bolee_500_ubezhichsh_naschityvaetsja_v_nizhnem_no_vgorode.html#:~:text=Фонд%20защитных%20сооружений%20гражданской%20обороны,вместимостью%20199%20тысяч%20208%20человек (дата обращения: 14.01.2023)

23. "ТЕРРА" составила карту бомбоубежищ Самары [Электронный ресурс]. Адрес доступа: <https://samara.bezformata.com/listnews/sostavila-kartu-bomboubezhish-samari/10108247/#:~:text=Сегодня%20известно%20примерно%20о%20100,меньше%20-%20всего%2040%20квадратов> (дата обращения: 14.01.2023)

24. Карта бомбоубежищ Омска [Электронный ресурс]. Адрес доступа: https://superomsk.ru/news/61955-karta_bomboubejichsh_omska/ (дата обращения: 14.01.2023)

25. Где в Ростове есть бомбоубежища в рабочем состоянии [Электронный ресурс]. Адрес доступа: <https://big-rostov.ru/eto-interesno/gde-v-rostove-est-bomboubezhishha-v-rabochem-sostoyanii/> (дата обращения: 14.01.2023)

26. Мест в бомбоубежищах хватит лишь для каждого десятого уфимца [Электронный ресурс]. Адрес доступа: <https://www.ufa.kp.ru/daily/25965.4/2903798/> (дата обращения: 14.01.2023)

27. Красноярцам назвали места убежищ на случай ЧП [Электронный ресурс]. Адрес доступа: <https://newslab.ru/news/922612> (дата обращения: 14.01.2023)

28. Менее половины воронежских бомбоубежищ готовы к приему граждан [Электронный ресурс]. Адрес доступа: <https://voronej.bezformata.com/listnews/polovini-voronezhskih-bomboubezhish/72476195/> (дата обращения: 14.01.2023)

29. Их строили для ядерной войны. По Перми раскидано 250 секретных бомбоубежищ [Электронный ресурс]. Адрес доступа: <https://properm.ru/news/society/44630/> (дата обращения: 14.01.2023)

30. Объекты гражданской обороны [Электронный ресурс]. Адрес доступа: <https://tu34.rosim.ru/press/229010> (дата обращения: 14.01.2023)

31. СП 165.1325800.2014. Инженерно-технологические мероприятия по гражданской обороне. - М. - 2014. – 82 с.
32. Каммерер, Ю.Ю. Защитные сооружения гражданской обороны. Устройство и эксплуатация / Ю.Ю. Каммерер, А.К. Кутырев, А.Е. Харкевич. - М: Энергоатомиздат, 1985. - 232 с.
33. Винокуров, Л.В. Способ определения координат подземного ядерного взрыва / Л.В. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2006. - № 6. - С. 157-162.
34. Зуев, А.М. Сейсмическое воздействие - поражающий фактор ядерного взрыва / А.М. Зуев // ОБЖ: Основы безопасности жизни. - 2015. - № 11. - С. 18-21.
35. Золоторева, В.С. Поражающие факторы ядерного взрыва // Физика и медицина: создавая будущее. Сборник материалов / В.С. Золоторева. - 2017. - С. 84-92.
36. Ганушкин, В.И. Приспособление подвалов существующих зданий под убежища / В.И. Ганушкин, В.И. Морозов, Б.И. Никонов, Г.И. Орлов. - М.: Стройиздат, 1971. - С.208.
37. Архипов, В.Н. Механическое действие ядерного взрыва / В.Н. Архипов, В.А. Борисов, А.М. Будков, В.В. Валько, А.М. Галиев. - М.: Физматлит, 2003. - 550 с.
38. Котляревский, В.А. Убежища гражданской обороны конструкции и расчет / В.А. Котляревский, В.И. Ганушкин, А.А. Костин, А.И. Костин, В.И. Ларионов. - М.: Стройиздат, 1989. – 304 с.
39. Боданский, М.Д. Расчет конструкций убежищ / М.Д. Боданский, Л.М. Горшков, В.И. Морозов, Б.С. Расторгуев. - М.: Стройиздат, 1974. - 207 с.
40. Руководство по проектированию строительных конструкций убежищ гражданской обороны. - М.: Стройиздат, 1982. - 295 с.
41. Кочарян, Г.Г. Возникновение и развитие процессов скольжения в зонах континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов. Обзор современного состояния вопроса / Г.Г. Кочарян // Физика Земли. - 2021. - №4. - С. 3-41.

42. Зубрицкий, М.А. Оценка сейсмостойкости высотных зданий и сооружений при воздействиях уровня "максимальное расчетное землетрясение" нелинейным статическим методом / М.А. Зубрицкий, О.Ю. Ушаков, Л.С. Сабитов // Строительство и реконструкция. - 2020. - № 3(89). - С. 63-71.

43. Чесноков, А.С. Оценка сейсмостойкости каменных зданий исторической застройки // автореферат дис. ... кандидата технических наук / Вост.-Сиб. гос. ун-т технологий и упр.. Улан-Удэ, 2016

44. Масляев, А.В. Сейсмостойкость зданий и здоровье людей // Жилищное строительство. - 2007. - № 5. - С. 23-24.

45. Шадунц, К.Ш. Расчеты сейсмостойкости реконструируемых зданий / К.Ш. Шадунц, М.Б. Мариничев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2003. - № 6. - С. 3-5.

46. Фахриддинов, У. Сейсмостойкость и повышение этажности кирпичных зданий // Жилищное строительство. - 2006. - № 12. - С. 13-15.

47. Абаев, З.К. Анализ сейсмостойкости конструктивных систем многоэтажных гражданских зданий / З.К. Абаев, М.Ю. Кодзаев, А.А. Бигулаев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2020. - Т. 16. - № 1. - С. 76-82.

48. Зайнулабидова, Х.Р. Оценка сейсмостойкости многоэтажных зданий при сейсмических воздействиях на слабых просадочных грунтах // Construction and Geotechnics. - 2022. - Т. 13. № 1. - С. 44-57.

49. Кабанцев О.В. О деформативности и сейсмостойкости конструкций из каменной кладки / О.В. Кабанцев, Г.П. Тонких // Промышленное и гражданское строительство. - 2019. - № 9. - С. 51-58.

50. Васильев, А.А. Оценка и прогнозирование физического износа строительных конструкций, зданий и сооружений / А.А. Васильев. - Гомель: Белорусский гос. ун-т транспорта, 2021. - 189 с.

51. Иванов, И.Ю. Определение износа сооружений при их подработке в автоматизированных системах градостроительных кадастров / И.Ю. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2009. - № 12. - С. 200-202.

52. Леджинов, В.С. Исследование методов физического износа зданий и сооружений / В.С. Леджинов // Проблемы формирования единого научного пространства. Сборник статей Международной научно-практической конференции. В 4-х частях. - 2017. - С. 60-62.

53. Максимова И.В. Мониторинг эксплуатационного износа зданий и сооружений и разработка матрицы организации капитальных и текущих ремонтов Shape * Mergeformat / И.В. Максимова // Евразийский союз ученых. - 2020. - № 10-6 (79). - С. 46-51.

54. Рожнов, К.В. Об определении функционального износа морских причальных гидротехнических сооружений / К.В. Рожнов // Вопросы оценки. - 2003. - № 4. - С. 40-45.

55. Казиев, В.М. Влияние функционального износа на общий накопленный износ зданий и сооружений / В.М. Казиев, А.А. Шибзухова // Сборник научных трудов SWorld. - 2014. - Т. 11., № 1. - С. 83-88.

56. Ramos Guerrero, J.A. Earthquake and deterioration inclusive probabilistic life cycle assessment (EDP-LCA) framework for buildings / J.A. Ramos Guerrero, T. Y. Yang, O. Swei // Resilient Cities and Structures, 2023.

57. Santa, A.C. Atmospheric deterioration of ceramic building materials and future trends in the field: a review / A.C. Santa, M.A. Gómez, J.G. Castaño, J.A. Tamayo, L.M. Baena // Heliyon, 2023. - Vol. 9, Is., e15028

58. Yuk H. Verification of particle matter generation due to deterioration of building materials as the cause of indoor fine dust / H. Yuk, S. Yang, S. Wi, Y. Kang, S. Kim // Journal of Hazardous Materials. - 2021.- Vol. 416. - 125920.

59. Zheng, X.-W. Life-cycle probabilistic seismic risk assessment of high-rise buildings considering carbonation induced deterioration / X.-W. Zheng, H.-N. Li, P. Gardoni // Engineering Structures. - 2021. - Vol. 231. - 111752.

60. Prieto, A.J. On the impacts of climate change on the functional deterioration of heritage buildings in South Chile / A.J. Prieto, K. Verichev, A. Silva, J. de Brito // Building and Environment. - 2020. - Vol. 183. - 107138.

61. Balaras, C.A. Deterioration of European apartment buildings / C.A. Balaras, K. Droutsas, E. Dascalaki, S. Kontoyiannidis // *Energy and Buildings*. 2005 - Vol. 37, Is. 5. - Pp. 515-527.

62. Brunner, S. An example of deteriorated vacuum insulation panels in a building façade / S. Brunner, T. Stahl, K. Ghazi Wakili // *Energy and Buildings*. - 2012. - Vol. 54. - Pages 278-282.

63. Subbotin, V.A. Reasons for Exterior Effective Brick Walls Deterioration as Exemplified with Buildings under Construction / V.A. Subbotin, I.A. Subbotin // *Procedia Engineering*. - 2016. - Vol. 150. - Pp. 1837-1840.

64. Assaad Abdelmseeh, V. Sulphate and sulphide corrosion in livestock buildings, Part I: Concrete deterioration / V. Assaad Abdelmseeh, J. Jofriet, G. Hayward // *Biosystems Engineering*. - 2008. - Vol. 99, Is. 3. - Pp. 372-381.

65. Zitek, P. Diffusion-model-based risk assessment of moisture originated wood deterioration in historic buildings / P. Zitek, T. Vyhlídal, J. Fišer, V. Tornari, E. Bernikola, N. Tsigarida // *Building and Environment*. - 2015. - Vol. 94, Part 1. - Pp. 218-230.

66. Vazquez, P. Influence of surface finish and composition on the deterioration of building stones exposed to acid atmospheres / P. Vazquez, L. Carrizo, C. Thomachot-Schneider, S. Gibeaux, F.J. Alonso // *Construction and Building Materials*. - 2016. - Vol. 106. - Pp. 392-403.

67. Barca, D. Impact of air pollution in deterioration of carbonate building materials in Italian urban environments / D. Barca, V. Comite, C.M. Belfiore, A. Bonazza, M.F. La Russa, S.A. Ruffolo, G.M. Crisci, A. Pezzino, C. Sabbioni // *Applied Geochemistry*. - 2014. - Vol. 48. - Pp. 122-131.

68. Kumar, R. Stochastic modeling of deterioration in buildings and civil infrastructure / R. Kumar, P. Gardoni // *Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems*. - Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. - 2013. - Pp. 410-434.

69. Antonov, A. Façade deterioration prediction with the use of machine learning methods, based on objective parameters and e-participation data / A. Antonov,

I. Khodnenko, S. Kudinov // Procedia Computer Science. - 2021. - Vol. 193. - Pp. 42-51

70. Manquehual, C.J. Investigation of leaching in steel fiber-reinforced shotcrete exposed to fresh and saline groundwater in a subsea road tunnel / C.J. Manquehual, P.D, Jakobsen, A. Bruland // Cement and Concrete Research. - 2022. - Vol. 163. - Article 107011

71. Вовк, А.И. "Реламикс торкрет": механизм действия и особенности набора прочности торкрет-бетоном. - Технологии бетонов. - 2011. - № 11-12 (64-65). - С. 25-27.

72. Han, R. Static pushover test of spring-underground structure system for seismic performance analysis of underground structure / R. Han, C. Xu, X. Du // Engineering Structures. - 2022. - Vol. 271. - Article 114936.

73. Алексеев, В.А. Оптимизация бетонных составов для набрызгбетонирования при сооружении подземных конструкций / В.А. Алексеев, С.И. Баженова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. - 2020. - № 1. - С. 8-17.

74. Гиренко, Ю.Е. Влияние подземных вод на бетонные сооружения Северомуйского тоннеля / Ю.Е. Гиренко, И.И. Верховин // Перспективы развития горно-металлургической отрасли (Игошинские чтения). Материалы конференции Всероссийской научно-практической конференции. - 2022. - С. 189-198.

75. Chen, Q. Synthetic experimental and numerical investigation on the vertical seismic effect on underground structures / Q. Chen, T. Zhang, Z. Zhao // Structures. - 2022. - Vol. 48. - pp. 1-20.

76. Wang, Y. Multi-location seismic isolation approach and design for underground structures employing the negative-stiffness amplification system / Y. Wang, Q. Chen, X. Wang // Tunnelling and Underground Space Technology. - 2022. - Vol. 122. - Article 104395.

77. Куликов, Ю.Н. Уплотняемость бетонной смеси - критерий прочности и водонепроницаемости отделки подземных сооружений // Горные науки и технологии. - 2014. - № 3. - С. 182-189.

78. Zhang, H. Waterproofing performance of polypropylene – concrete wall of underground silo under combined compressive stress and water pressure / H. Zhang, H. Wang, Z. Chang // *Heliyon*. - 2022. - Vol. 8, Issue 12. - Article e12074.

79. Богачев, Г.Г. Влияние тонкости помола цемента бетонных обделок подземных сооружений на их надежность и прочностные характеристики // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. - 2005. - № 10. - С. 15-19.

80. Wang, X. Influence of materials and nozzle geometry on spray and placement behavior of wet-mix shotcrete / X. Wang, Md.M. Islam, Q. Zhang // *Case Studies in Construction Materials*. - 2024. - Vol. 20. - e02852. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02852>.

81. Malmgren, L. Interaction of shotcrete with rock and rock bolts - a numerical study / L. Malmgren, E. Nordlund // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. - 2008. - Vol. 45 (4). - Pp. 538–553, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.07.024>.

82. Bernardo, G. Advancements in shotcrete technology / G. Bernardo, A. Guida, I. Mecca // *WIT Trans. Built Environment*. - 2015. - Vol. 153. - Pp. 591–602, <https://doi.org/10.2495/STR150491>

83. Heidarneshad, F. Shotcrete based 3D concrete printing: State of art, challenges, and opportunities / F. Heidarneshad, Q. Zhang // *Construction and Building Materials*. - 2022. - Vol. 323. - 126545, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126545>

84. Zaffaroni, P. High performance shotcrete / P. Zaffaroni, C. Pistolesi, E. Dal Negro, L. Coppola, M. Collepardi, // *L'industria Ital. Del. Cem.* - 2000. - Vol. 7 (8). - Pp. 598–602.

85. Lu, B. Effect of spray-based printing parameters on cementitious material distribution / B. Lu, M. Li, W. Lao, Y. Weng, S. Qian, M.J. Tan, K.F. Leong // *2018 Int. Solid Free. Fabr. Symp.* - University Texas Austin. - 2018. <https://doi.org/10.26153/tsw/17198>.

86. Choi, P. Effects of mineral admixtures and steel fiber on rheology, strength, and chloride ion penetration resistance characteristics of wet- mix shotcrete mixtures containing crushed aggregates / P. Choi, K.K. Yun, J.H. Yeon // *Construction and*

Building Materials. - 2017. - Vol. 142. - Pp. 376–384,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.093>.

87. Wolsiefer, J. Silica fume in shotcrete / J. Wolsiefer, D.R. Morgan // Concrete International. - 1993. - Vol. 15 (4). - Pp. 34–39.

88. Bohac, M. The role of SCM's on rheology of sprayed mortar / M. Bohac, D. Kubatova, M.K. Kotlanova, I. Khongova, A. Zezulova, T. Stanek // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - Vol. 1039. - 012001,
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1039/1/012001>.

89. Pan, G. A study of the effect of rheological properties of fresh concrete on shotcrete-rebound based on different additive components / G. Pan, P. Li, L. Chen, G. Liu // Construction and Building Materials. - 2019. - Vol. 224. - Pp. 1069–1080,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.060>.

90. Liu, G. Rheological properties of fresh concrete and its application on shotcrete / G. Liu, W. Cheng, L. Construction and Building Materials. - 2020. - Vol. 243 (1). - 118180, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118180>.

91. Liu, Z. Influences on Shotcrete Rebound from Walls with Random Roughness / Z. Liu, W. Bian, G. Pan, P. Li, W. Li // Advances in Materials Science Engineering. - 2018, <https://doi.org/10.1155/2018/7401358>.

92. Лесовик, В.С. Композиты нового поколения для специальных сооружений / В.С. Лесовик, Р.С. Федюк // Строительные материалы. - 2021. - № 3. - С. 9-17.

93. Лесовик, В.С. Повышение эксплуатационных характеристик защитных композитов / В.С. Лесовик, Р.С. Федюк, А.М. Гридчин, Г. Мурали // Строительные материалы. - 2021. - № 9. - С. 32-40.

94. Лесовик, В.С. Повышение эффективности малопроницаемых цементных композитов / В.С. Лесовик, Р.С. Федюк // Вестник МГСУ. - 2021. - Т. 16. № 10. - С. 1346-1356.

95. Пугин, К.Г. Улучшение характеристик грунтов, используемых для дорожного строительства / К.Г. Пугин, И.О. Норин, А.И. Кетов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. - 2023. - № 1. - С. 13-19.

96. Stroková, V.V. Properties of a composite cement binder using fuel ashes / V.V. Stroková, I.Yu. Markova, A.Yu. Markov, M.A. Stepanenko, S.V. Nerovnaya, D.O. Bondarenko, L.N. Botsman // *Key Engineering Materials*. - 2022. - Vol. 909. - pp. 184-190.

97. Shakouri, M. Evaluating the performance of thermomechanically beneficiated fly ash blended mortar / M. Shakouri, A.A. Ahmed, M. Teymouri // *Construction and Building Materials*. - 2024. - Vol. 411. - 134401.

98. Yan, J. A multi-perspective study on the influence of physical and chemical properties of 5 types of fly ash on the performance of high-volume blended fly ash cementitious slurry / J. Yan, Z. Zhu, R Liu, M. Chen, C. Shao, C. Zhang, X. Li // *Construction and Building Materials*. - 2024. - Vol. 411. - 134301.

99. Liu, W. Rheology, mechanics, microstructure and durability of low-carbon cementitious materials based on circulating fluidized bed fly ash: A comprehensive review / W. Liu, X. Liu, L. Zhang, Y. Wan, H. Li, X. Jiao // *Construction and Building Materials*. - 2024. - Vol. 411. - 134688

100. Singh, S.B. Effect of fly ash addition on the mechanical properties of pervious concrete / S.B. Singh, M. Murugan, M. Chellapandian, S. Dixit, S. Bansal, K.S. Kumar Reddy, M. Gupta, K.M. Vafaeva // *Materialstoday:proceedings*. - 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.165>

101. Venkitasamy, V. Mechanical and durability properties of structural grade heavy weight concrete with fly ash and slag / V. Venkitasamy, M. Santhanam, B.P.C. Rao, S. Balakrishnan, A. Kumar // *Cement and Concrete Composites*. - 2024. - Vol. 145. - 105362.

102. Zeynali, Y. Stabilizing cohesive soils with Micro- and Nano- fly ash as Eco-friendly Materials: An experimental study / Y. Zeynali, H. Niroumand, R.Z. Moayed // *Construction and Building Materials*. - 2023. - Vol. 399. - 132490.

103. Zhang, H. High-flowable and high-performance steel fiber reinforced concrete adapted by fly ash and silica fume / H. Zhang, L. Cao, Y. Duan, Z. Tang, F. Hu, Z. Chen // *Case Studies in Construction Materials*. - 2023. - e02796.

104. Hosseinzadeh, M. Exploring elastic properties of fly ash recycled aggregate concrete: Insights from multiscale modeling and machine learning / M. Hosseinzadeh, M. Dehestani, A. Hosseinzadeh // Structures. - 2024. - Vol. 59. - 105720.

105. Hossain, Md.A. Exploring the synergistic effect of fly ash and jute fiber on the fresh, mechanical and non-destructive characteristics of sustainable concrete / Md.A. Hossain, S.D. Datta, A.S. Mohammad Akid, Md.H. Rahman Sobuz, Md.S. Islam // Heliyon. - 2023. - Volume 9(11), e21708

106. Vatin, N. Cement-based materials with oil shale fly ash additives / N. Vatin, Y. Barabanshchikov, K. Usanova, S. Akimov, A. Kalachev, A. Uhanov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020 Vol. 17. - 012043.

107. Яковлев, Г.И. Об опыте применения метакаолина в качестве структурирующей добавки в цементных композитах / Г.И. Яковлев, Г.Н. Первушин, И.А. Пудов, И.С. Полянских, З.С. Саидова // Вестник ВСГУТУ. - 2021. - № 2 (81). - С. 58-68.

108. Kapustin, F.L. Binding agents of autoclaved hardening based on metallurgical slags / F.L. Kapustin, S.N. Pogorelov // Lecture Notes in Civil Engineering. - 2022. - Vol. 168. - pp. 95-104.

109. Teixeira, E.R. Synergetic effect of biomass fly ash on improvement of high-volume coal fly ash concrete properties / E.R. Teixeira, A. Camões, F.G. Branco // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 314, Part A. - 125680

110. Kumar, B.G. The effect of silica fume on the washout resistance of environmentally friendly underwater concrete with a high-volume of siliceous fly ash / B.G. Kumar, M. Muthu, V. Govindaraj // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 327. – 127058.

111. Муртазаев, С.-А.Ю. Использование золошлаковых смесей ТЭЦ для производства композиционных гипсовых вяжущих / С.-А.Ю. Муртазаев, Н.В. Чернышева, А.Х. Аласханов // Экология и промышленность России. - 2013. - № 7. - С. 26-29.

112. Liu, J. Predicting the chloride diffusion in concrete incorporating fly ash by a multi-scale model / J. Liu, Y. Wang // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 330. – 129767.

113. Zeng, H. Effect of limestone powder and fly ash on the pH evolution coefficient of concrete in a sulfate-freeze-thaw environment / H. Zeng, Y. Li, K. Zhang // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 16. – pp. 1889-1903.

114. Nochaiya, T. Acidic corrosion-abrasion resistance of concrete containing fly ash and silica fume for use as concrete floors in pig farm / T. Nochaiya, T. Suriwong, P. Julphunthong // *Case Studies in Construction Materials*. – 2022. – Vol. 16. - e01010.

115. Пухаренко, Ю.В. Стойкость фибробетона к высокотемпературному воздействию / Ю.В. Пухаренко, М.П. Кострикин // *Строительство и реконструкция*. - 2020. - № 2 (88). - С. 96-106.

116. Behl, V. Characterization of physico-chemical and functional properties of fly ash concrete mix / V. Behl, V. Singh, A. Kumar // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 50, Part 5. – pp. 941-945.

117. Fuzail Hashmi, A. An investigation into age-dependent strength, elastic modulus and deflection of low calcium fly ash concrete for sustainable construction / A. Fuzail Hashmi, M. Shariq, A. Baqi // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Vol. 283. – 122772.

118. Чернышов, Е.М. Концепция, методология и прикладные решения проблемы строительного-технологического утилизации техногенных отходов / Е.М. Чернышов, И.И. Акулова, М.А. Гончарова, О.Р. Сергуткина, Н.Д. Потамошнева // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. - 2020. - № 8 (740). - С. 70-91.

119. Гончарова, М.А. Исследование коррозионной стойкости жаростойких шлакобетонов при длительной выдержке в агрессивной сульфатной среде / М.А. Гончарова, Т.К. Акчурин, А.А. Коста // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. - 2020. - № 1 (78). - С. 136-141.

120. Патент на изобретение 2738150 С1, 08.12.2020. Заявка № 2020116205 от 18.05.2020 / В.Т. Ерофеев, Д.В. Емельянов, А.И. Родин, В.Т. Фомичев, А.А. Матвиевский, И.В. Ерофеева, А.П. Волков, А.Д. Богатов, С.В. Казначеев, Д.С. Аль, А.И. Сальникова. Высокопрочный порошково-активированный бетон.

121. Федосов, С.В. Кольматация пор при жидкостной коррозии бетона / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, А.С. Евсяков // Современные строительные материалы и технологии. Сборник научных статей III Международной конференции. - Калининград, 2021. - С. 78-86.

122. Овчаренко, Г.И. Активизация низкокачественных золошлаков ТЭЦ Г.И. Овчаренко, А.В. Викторов, К.В. Петухова, А.Е. Соловьева // Ползуновский альманах. - 2023. - № 1. - С. 120-122.

123. Ядыкина, В.В. Повышение эффективности бетонов за счет модифицирования поверхности дисперсных минеральных наполнителей / В.В. Ядыкина, Е.А. Лукаш // Технологии бетонов. - 2014. - № 1 (90). - С. 16-18.

124. Каприелов, С.С. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций / С.С. Каприелов, И.А. Чилин // Вестник НИЦ Строительство. - 2017. - № 1 (12). - С. 14-22.

125. Xie, H. Research on energy dissipation and damage evolution of dynamic splitting failure of basalt fiber reinforced concrete / H. Xie, L. Yang, K. Zhao // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 330. – 127292.

126. Айзенштадт, А.М. Активность поверхности порошков Материалы / А.М. Айзенштадт, Т.А. Дроздюк, В.Е. Данилов, М.А. Фролова, Г.А. Гарамов // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. - 2021. - Т. 13. № 2. - С. 108-116.

127. Zhao, G. Utilization of recycled concrete powder in modification of the dispersive soil: A potential way to improve the engineering properties / G. Zhao, Z. Zhu, G. Ren, T. Wu, P. Ju, S. Ding, M. Shi, H. Fan // Construction and Building Materials. - 2023. - Vol. 389. - 131626.

128. Glarborg, C.N. Local recycling and reuse of concrete and soil: The societal impact of double-loop learning from circular urban transformation projects / C.N. Glarborg, M.V. Buchard, T.B. Christensen. - 2023. - 100034.

129. Chen, J.-Y. Numerical modeling of the damage mechanism of concrete-soil multilayered medium subjected to underground explosion using the GPU-accelerated SPH / J.-Y. Chen, D.-L. Feng, J.-H. Liu, S.-Y. Yu, Y. Lu // Engineering Analysis with Boundary Elements. - 2023. - Vol. 151. - pp. 265-274.

130. Xiong, W. Experimental investigation on physical and mechanical properties of excavated soil- and fine recycled concrete aggregate-based unfired clay bricks containing compound additives / W. Xiong, H. Zhu, J. Xu, J. Ma, C. Luo // *Case Studies in Construction Materials*. - 2023. - Vol. 18. - e02057.
131. Wu, B. Shrinkage behavior of recycled lump/aggregate concrete containing recycled sand from weathered residual soil of granite / B. Wu, Z. Wang, Z. Chen // *Construction and Building Materials*. - 2023. - Vol. 394. - 132146.
132. Wang, L. Determination of soil pH from Vis-NIR spectroscopy by extreme learning machine and variable selection: A case study in lime concretion black soil / L. Wang, R. Wang // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. - 2022. - Vol. 283. - 121707.
133. Machado, L.C. Simple way to model the mechanical properties of concretes with recycled concrete aggregates / L.C. Machado, B.L. Daminieli, M.S. Rebmann, S.C. Angulo // *Journal of Building Engineering*. - 2023. - 108213.
134. Yan, Z.-W. Experimental study on dynamic properties of flax fiber reinforced recycled aggregate concrete / Z.-W. Yan, Y.-L. Bai, Q. Zhang, J.-J. Zeng // *Journal of Building Engineering*. - 2023. - Vol. 80. - 108135.
135. Saberian, M. Mechanical properties of polypropylene fibre reinforced recycled concrete aggregate for sustainable road base and subbase applications / M. Saberian, A. Tajaddini, J. Li, G. Zhang, L. Wang, D. Sun, T. Maqsood, R. Roychand // *Construction and Building Materials*. - 2023. - Vol. 405. - 133352.
136. Suresh, M. Utilization of recycled concrete wastes and latex polymer for sustainable road construction / M. Suresh, M. Pal // *Materials Today: Proceedings*. - 2021. - Vol. 47, Part 14. - Pp. 4171-4176.
137. Al-Ali, E.A. Effect of using recycled aggregates as road subbase materials: A case study from Kuwait City / E.A. Al-Ali, W.K. Eid // *Kuwait Journal of Science*. - 2023. - Vol. 50, Is. 4. - pp. 739-745.
138. Liu, X. Discrepancies in life cycle assessment applied to concrete waste recycling: A structured review / X. Liu, V. Asghari, C.-M. Lam, S.-C. Hsu, D. Xuan, S.C. Angulo, V.M. John, A.S. Basavaraj, R. Gettu, J. Xiao, C.-S. Poon // *Journal of Cleaner Production*. - 2024. - Vol. 434. - 140155.

139. Ma, M. Analysing the impacts of key factors on the price of recycled concrete: A system dynamics model / M. Ma, V.WY. Tam, K.N. Le, R. Osei-Kyei // Journal of Building Engineering. - 2023. - Vol. 80. - 108123.

140. Логанина, В.И. Репрезентативность выборки при оценке качества строительных материалов / В.И. Логанина, М.В. Зайцева // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - 2022. - № 1 (270). - С. 67-70.

141. Ушеров-Маршак, А.В. Калориметрия цемента и бетона: Избранные труды. Харьков: Факт, 2002. 180 с.

142. Лесовик, В.С. Закон сродства структур в материаловедении / В.С. Лесовик, Л.Х. Загороднюк, И.Л. Чулкова // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 3-2. – С. 267-271.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Артёмспецстрой»



Миронов А.А.

« 01 » 10 2022 г.

АКТ

**организации производственного цеха по
обогащения золошлаковой смеси для получения активных
добавок в вяжущее**

г. Артём Приморского края - « 01 » 10 2022 г.

Комиссия в составе главного инженера ООО "Артёмспецстрой" к.т.н. Баранова Андрея Вячеславовича, профессора Дальневосточного федерального университета д.т.н., доц. Федюка Романа Сергеевича, соискателя Панарина Игоря Ивановича подтверждает открытие цеха в ООО "Артёмспецстрой" по обогащению золошлаковой смеси теплоэлектростанций для получение активных добавок в вяжущее.

Годовая производительность цеха - 10 000 тонн.

Главный инженер ООО «Артёмспецстрой» к.т.н.

Баранов А.В.

Профессор военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете, д.т.н., доцент

Федюк Р.С.

Соискатель

Панарин И.И.

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ЗАСТРОЙЩИК «УНР 2020»

ОГРН 1202500017202, ИНН 2543150940 КПП 254301001

Юр.адрес: 690039, г. Владивосток, ул. Феодосийская, 46 пом 9/10.

Электронная почта: unr-2020@mail.ru тел. 8 423 2 205-203

от 22.12.2023

СПРАВКА
о выпуске опытной партии торкрет-бетонов

Общество с ограниченной ответственностью «Специализированный застройщик УНР 2020» произвело выпуск опытной партии торкрет-бетонов, разработанных И.И. Панариным в рамках подготовки диссертации «КОМПОЗИЦИОННЫЕ ЦЕМЕНТЫ, АКТИВИРОВАННЫЕ ОБОГАЩЕННЫМИ ЗОЛОШЛАКОВЫМИ СМЕСЯМИ, И ТОРКРЕТ-БЕТОНЫ НА ИХ ОСНОВЕ» в объеме 15 000 м³.

Состав

№ состава (используемый цемент)	Расход, кг на 1 м ³								В/В
	Клин-кер	АСС	Гипс	Бетонный лом	Вода	СП	Реолен	Отсев (M _{кр} =2,7)	
ТБ11(КЦ-35Б)	292,5	157,5	12,4	67,5	157,5	3,375	2,25	1350	0,35

Механические свойства

Свойства	ТБ11
Предел прочности при сжатии, МПа на 2 сутки	30,5
на 7 сутки	39,3
на 28 суток	74,4
$R_{сж}^2 / R_{сж}^{28}$	0,41
Предел прочности при изгибе, МПа на 2 сутки	3,2
на 7 сутки	5,5
на 28 суток	11,2
$R_{из} / R_{сж}, 2 \text{ суток}$	0,30
$R_{из}^2 / R_{из}^{28}$	0,11
$R_{из} / R_{сж}, 7 \text{ сут.}$	0,14
$R_{из} / R_{сж}, 28 \text{ сут.}$	0,15

Генеральный директор



М.В. Зозулинский

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
УК «Темп»

г. Артём Приморского края



Назаров В.Е.

12 2022 г.

АКТ
внедрения разработанных материалов

г. Артём Приморского края

«26» 12 2022 г.

Комиссия в составе: главного инженера УК «Темп» Журикова Константина Геннадьевича, профессора военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете, д.т.н., доцента Федюка Романа Сергеевича, начальника кафедры военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете Панарина Игоря Ивановича участвовала в применении разработанных материалов для комплексного ремонта подземных сооружений. Внедрение было осуществлено при выполнении работ по усилению подвальных помещений в многоэтажных жилых домах г. Артеме по адресам: ул. Кирова, дома 150 и 152. (постройки 1980 г.). Достигнутый эффект подтверждается тем, что технические характеристики подземных сооружений соответствуют требованиям СП 88.13330.2014 «Защитные сооружения гражданской обороны».

Главный инженер ООО УК «Темп»

Журиков К.Г.

Профессор военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете, д.т.н., доцент

Федюк Р.С.

Соискатель

Панарин И.И.

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Артёмспецстрой»



Миронов А.А.
«09» 01 2023 г.

**АКТ
внедрения разработанного торкрет-бетона**

г. Артём Приморского края

«09» 01 2023 г.

Комиссия в составе: главного инженера ООО «Артёмспецстрой» к.т.н. Баранова Андрея Вячеславовича, профессора военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете, д.т.н., доцента Федюка Романа Сергеевича, начальника кафедры военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете Панарина Игоря Ивановича провела натурные испытания разработанного торкрет-бетона. Внедрение было осуществлено при ремонте подземного перехода через ул. Фрунзе.

Технические характеристики подземных сооружений соответствуют требованиям СП 88.13330.2014 «Защитные сооружения гражданской обороны».

Главный инженер ООО «Артёмспецстрой», к.т.н.

Handwritten signature of A.V. Baranov in blue ink.

Баранов А.В.

Профессор военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете, д.т.н., доцент

Handwritten signature of R.S. Feduk in blue ink.

Федюк Р.С.

Соискатель

Handwritten signature of I.I. Panarin in blue ink.

Панарин И.И.

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ЗАСТРОЙЩИК «УНР 2020»**

ОГРН 1202500017202, ИНН 2543150940 КПП 254301001

Юр.адрес: 690039, г. Владивосток, ул. Феодосийская, 46 пом 9/10.

Электронная почта: unr-2020@mail.ru, тел. 8 423 2 205-203

от 09.01.2024

**АКТ
внедрения результатов диссертации**

Общество с ограниченной ответственностью «Специализированный застройщик УНР 2020» подтверждает внедрение торкрет-бетонов, разработанных И.И. Панариным в рамках подготовки диссертации «КОМПОЗИЦИОННЫЕ ЦЕМЕНТЫ, АКТИВИРОВАННЫЕ ОБОГАЩЕННЫМИ ЗОЛОШЛАКОВЫМИ СМЕСЯМИ, И ТОРКРЕТ-БЕТОНЫ НА ИХ ОСНОВЕ», в объеме 15 000 м³ при ремонте следующих железобетонных сооружений г. Владивостока:

- подвалы жилых домов по ул. Космонавтов д. 9, д. 11, д. 13 (1973 г. постройки);

- подземные переходы через ул. Гоголя и ул. Жигура.

Генеральный директор



М.В. Зозулинский



Наладка-ДВ

690109 Приморский край, Владивостокский
г.о., г. Владивосток,
ул. Нейбута, д. 137, пом. 5
ИНН 2540161824 КПП 253601001
Телефон: (423) 201-92-01,
mail naladka-dv@mail.ru

Дальневосточный
федеральный университет

Панарину Игорю Ивановичу

Адрес: 690091, г.
Владивосток
ул. Экипажная д. 18 стр.1

Уважаемый Игорь Иванович!

Общество с ограниченной ответственностью «Наладка-ДВ» заинтересовано в применении (приобретении) торкрет-бетонов и инъекционных растворов, разработанных Вами при подготовке диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук для применения их для усиления стен и закрепления грунтов подземных частей в процессе строительства сооружений и зданий в г. Петропавловске-Камчатском (Камчатском крае), относящемуся к сейсмоопасному региону в Российской Федерации.

Изготовление строительных материалов планируется с применением местных техногенных ресурсов Камчатского края в 2024-2025 годах на объектах работ ООО «Наладка-ДВ» со среднегодовой потребностью 12 000 м³ торкрет-бетонной смеси и 20 000 м³ инъекционных растворов.

Генеральный директор



Латышев В.В.

ООО СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ЗАСТРОЙЩИК «ПАТРОКЛ»

690011, г. Владивосток, ул. Феодосийская, д. 46 пом. 8
ИНН: 2543085963 ОГРН 1152543024292 КПП 253701001, телефон: 8 (423) 2205-203
Email: iskpatrokl@mail.ru

Исх. 153 /22 от 15.11.2022

Начальнику кафедры
Военного учебного центра
при Дальневосточном
федеральном университете
И.И. Панарину

690091 г. Владивосток
ул. Экипажная д. 18 стр.1

Уважаемый Игорь Иванович!

ООО Специализированный застройщик «Патрокл» заинтересовано в приобретении торкрет-бетонов и инъекционных растворов, разработанных Вами при подготовке диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук для применения их при комплексном ремонте подземных частей зданий и сооружений в г. Владивостоке. Ремонт планируется в 2023-2024 годах на объектах застройки ООО СЗ «Патрокл» с годовой потребностью 10000 м³ торкрет-бетонной смеси и 15000 м³ инъекционных растворов.

Генеральный директор



А.В. Ситник

2023, March, 6

Mr. Igor Panarin
Vladivostok, Russia

The construction company confirms the prospects of your developed building materials. The shotcrete and injection mortars created by you as a result of the preparation of your dissertation have a good potential for the comprehensive repair of underground structures. The repair carried out will allow efficient operation of facilities in seismically hazardous areas.

The construction company confirms its intention to use your shotcrete and injection mortars for the renovation of underground structures in Istanbul in 2024-2025.

Head of Advanced Development Department



Tanio Natios



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
АРТЕМСПЕЦСТРОЙ

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор ООО
«Артемспецстрой»



Миронов А.А.

« 09 »

01

2023

КОМПОЗИЦИОННЫЙ ЦЕМЕНТ

Технические условия
СТО 02033957-060-2023

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель, д.т.н., доц.

Федюк Р.С.

Соискатель

Панарин И.И.

г. Артем
2023



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
АРТЕМСПЕЦСТРОЙ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО
«Артемспецстрой»



Миронов А.А.

2023

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

на производство торкрет-бетона

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель, д.т.н., доц.

Федюк Р.С.

Соискатель

Панарин И.И.

г. Артем
2023



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»
(ДВФУ)
Политехнический институт

СПРАВКА
о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

Результаты диссертации Панарина Игоря Ивановича на тему «КОМПОЗИЦИОННЫЕ ЦЕМЕНТЫ, АКТИВИРОВАННЫЕ ОБОГАЩЕННЫМИ ЗОЛОШЛАКОВЫМИ СМЕСЯМИ, И ТОРКРЕТ-БЕТОНЫ НА ИХ ОСНОВЕ» используются в учебном процессе Дальневосточного федерального университета по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» и направлению подготовки «Строительство»: 08.03.01 (бакалавриат) и 08.04.01 (магистратура), а также при выполнении курсовых проектов, научно-исследовательских и выпускных квалификационных работ.

Заместитель директора по НИР,
д.т.н., проф.



В.И. Петухов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2786125

Бетонная смесь

Патентообладатель: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет" (ДФУ) (RU)**

Авторы: **Федюк Роман Сергеевич (RU), Панарин Игорь Иванович (RU), Лисейцев Юрий Леонидович (RU), Потапов Вадим Владимирович (RU)**

Заявка № 2022101932

Приоритет изобретения **28 января 2022 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **19 декабря 2022 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **28 января 2042 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94e8bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.03.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2801028

БЕТОННАЯ СМЕСЬ

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Лесовик Валерий Станиславович (RU), Клюев Сергей Васильевич (RU), Лесовик Руслан Валерьевич (RU), Сяо Вюньсюй (CN), Федюк Роман Сергеевич (RU), Панарин Игорь Иванович (RU)*

Заявка № 2023106793

Приоритет изобретения 22 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 01 августа 2023 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 22 марта 2043 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2806396

**СПОСОБ ОБОГАЩЕНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ
СМЕСЕЙ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ
ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Лесовик Валерий Станиславович (RU), Ключев Сергей Васильевич (RU), Лесовик Руслан Валерьевич (RU), Сяо Вюньсюй (RU), Федюк Роман Сергеевич (RU), Панарин Игорь Иванович (RU), Козлов Павел Геннадьевич (RU)*

Заявка № **2023114115**

Приоритет изобретения **30 мая 2023 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **31 октября 2023 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **30 мая 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

