

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**

На правах рукописи



ХМАРА НАТАЛИЯ ОЛЕГОВНА

**МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ БЕЛОГО ЦЕМЕНТА
ДЛЯ САМООЧИЩАЮЩИХСЯ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Строкова В.В.**

Белгород 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	12
1.1 Тонкостенные изделия из мелкозернистого бетона как элемент системы «человек – материал – среда обитания».....	12
1.2 Требования к свойствам растворной смеси и бетонам для производства тонкостенных изделий.....	20
1.3 Состав и свойства бетонов для тонкостенных изделий	25
1.4 Повышение характеристик бетонов с использованием минеральных добавок	33
1.5 Выводы.....	40
2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	43
2.1 Характеристика сырьевых материалов.....	43
2.2 Методы исследования, приборы и оборудование	47
2.3 Выводы.....	51
3 СОСТАВ И СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ С КОМПЛЕКСОМ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК	53
3.1 Концепция дизайна исследования для проведения сегментированного эксперимента	53
3.2 Модификация (подготовка) вспученного перлитового песка как полифункционального компонента белого вяжущего	61
3.3 Свойства цементной системы с комплексом минеральных добавок	84
3.4 Выводы.....	107
4 РАЗРАБОТКА СОСТАВА И СВОЙСТВА БЕЛОГО МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА ДЛЯ САМООЧИЩАЮЩИХСЯ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ	112
4.1 Расчет и подбор состава белого мелкозернистого бетона для самоочищающихся тонкостенных изделий.....	113

4.2 Свойства белого мелкозернистого бетона для самоочищающихся тонкостенных изделий	117
4.3 Атмосферостойкость белого мелкозернистого бетона для самоочищающихся тонкостенных изделий	122
4.4 Фотокаталитическая активность белого мелкозернистого бетона для самоочищающихся тонкостенных изделий	129
4.5 Выводы	135
5 ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ БЕЛОГО ЦЕМЕНТА ДЛЯ САМООЧИЩАЮЩИХСЯ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	138
5.1 Архитектурно-дизайнерские решения для тонкостенных изделий из мелкозернистого бетона на основе белого цемента	138
5.2 Технология производства фасадных декоративных панелей из мелкозернистого бетона на основе белого цемента	143
5.3 Техничко-экономическое обоснование эффективности производства самоочищающегося мелкозернистого бетона на основе белого цемента	146
5.4 Финансовая поддержка и апробация диссертационного исследования.....	149
5.5 Выводы.....	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	152
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	155
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	178
Приложение А. Состав и свойства вяжущих и бетонов применяемых для тонкостенных изделий	179
Приложение Б. Титульный лист технологического регламента на производство полифункционального композиционного материала на основе вспученного перлитового песка	190
Приложение В. Акт выпуска опытной партии полифункционального	

композиционного материала.....	191
Приложение Г. Титульный лист стандарта организации на самоочищающийся мелкозернистый бетон на основе белого портландцемента для тонкостенных изделий	192
Приложение Д. Титульный лист технологического регламента на изготовление самоочищающегося мелкозернистого бетона на основе белого портландцемента для тонкостенных изделий	193
Приложение Е. Акт выпуска опытной партии самоочищающихся фа- садных панелей из мелкозернистого бетона на основе белого цемента .	194
Приложение Ж. Справка о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс	195

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В современном строительстве и при обустройстве городской инфраструктуры, в том числе рекреационных зон, актуальность набирают тонкостенные бетонные изделия и конструкции светлых оттенков, так как они одновременно отвечают требованиям декоративности, экологичности, простоты изготовления, возможности использования местных материалов и реализации сложных дизайнерских проектов с использованием элементов сложных форм. С учетом малой толщины таких изделий, для их изготовления применяется мелкозернистый бетон, который должен обладать повышенной атмосферостойкостью для эксплуатации вне помещений. Это связано с тем, что тонкостенные изделия в большей степени подвержены интенсивной циркуляции влаги, которая с течением времени приводит к потере декоративных характеристик и нарушению целостности изделий. Интенсивная циркуляция влаги в том числе нежелательна для изделий с фотокатализатором, обеспечивающим самоочищение поверхности материалов, т.к. она не только может привести к его вымыванию из бетонной матрицы, но и к быстрой карбонизации поверхности, что способно экранировать, замедлять и останавливать процессы фотокаталитического очищения. Для получения бетонных изделий белого цвета диапазон возможного сырья резко сокращается при сохраняющейся необходимости снижения расхода цемента. В связи с этим, актуальной задачей является разработка бетонов с пониженным содержанием портландцемента на основе минеральных компонентов белого цвета при максимальном вовлечении в их производство техногенного (вторичного) минерального сырья, а также с применением полифункционального композиционного материала (ПКМ) системы «вспученный перлитовый песок – наноразмерный анатаз» («ВПП–Ан»), обеспечивающих долговечность и сохранение декоративности тонкостенных изделий при агрессивных атмосферных воздействиях в процессе эксплуатации.

Работа выполнялась при финансовой поддержке в рамках реализации: гос. задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006, РНФ 19-19-00263.

Степень разработанности темы. Разработке современных

высокоэффективных мелкозернистых бетонов конструкционного и декоративного назначения на основе портландцемента с модифицирующими добавками различного состава посвящены исследования ведущих научных школ РФ в области строительного материаловедения. Однако, ввиду малого распространения производителей белого портландцемента, большинство работ связано с использованием серого портландцемента, цвет которого не накладывает ограничения на цвет используемых добавок и заполнителей. В направлении изучения минеральных добавок и заполнителей белого цвета известны работы, посвященные исследованию влияния вспученного перлитового песка в качестве легкого заполнителя на цементные системы, а также исследования применения микрокальцита для повышения удобоукладываемости, прочности и декоративных качеств композитов. С другой стороны, влияние диоксида титана (TiO_2), как фотокатализатора в бетонных смесях, активно исследуется с фокусом на самоочищающиеся свойства. При этом остается открытым вопрос возможности комплексного применения минеральных добавок различного генетического типа и масштабного уровня совместно с белым портландцементом в составе мелкозернистых бетонов для создания тонкостенных изделий с высоким декоративным потенциалом.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение белого мелкозернистого бетона для самоочищающихся тонкостенных изделий.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи**:

- разработка способа модификации (подготовки) вспученного перлитового песка как компонента ПКМ самоочищающегося мелкозернистого бетона на основе белого цемента;
- определение свойств ПКМ системы «вспученный перлитовый песок – наноразмерный анатаз» («ВПП–Ан») как компонента цементного вяжущего;
- изучение комплексного влияния минеральных добавок различного генетического типа и масштабного уровня на свойства белого портландцемента, процессы его фазо- и структурообразования;
- разработка состава и изучение свойств, в том числе атмосферостойкости,

мелкозернистого бетона на основе белого портландцемента с комплексом минеральных добавок для самоочищающихся тонкостенных изделий;

– подготовка нормативной документации для реализации теоретических и экспериментальных исследований. Апробация работы.

Научная новизна работы. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение белого мелкозернистого бетона с высокими физико-механическими характеристиками для самоочищающихся тонкостенных изделий. Предварительная кислотная обработка и совместный помол с анатазом вспученного перлитового песка, выполняющего роль пуццоланового компонента и носителя фотокатализатора, позволяет повысить пуццоланическую (за счет увеличения удельной поверхности и механо-химической активации поверхности) и фотокаталитическую (за счет формирования связей Ti-O-Si) активность ПКМ системы «ВПП–Ан». Комплексное применение нано- (диоксид титана) и микроразмерных (микрокальцит) минеральных добавок в сочетании с пластификатором и мрамором в качестве заполнителя обеспечивает снижение капиллярной пористости, тем самым позволяя уменьшить проницаемость цементной матрицы при циркуляции влаги, что обеспечивает повышение атмосферостойкости тонкостенных изделий.

Выявлен характер влияния комплекса минеральных добавок на процессы фазо- и структурообразования белого портландцемента, в том числе: реологические параметры, кинетику тепловыделения, фазовый состав продуктов гидратации, микроструктуру, активность вяжущего. Совместное использование ПКМ системы «ВПП–Ан», полидисперсного микрокальцита и поликарбоксилатного пластификатора при замене 40 % белого цемента позволяет: снизить водопотребность на 15 % (по сравнению с использованием смеси ВПП и анатаза); интенсифицировать процессы гидратации – смещение основного пика тепловыделения при гидратации на 27 мин. и повышение интенсивности тепловыделения на 21 %; снизить микропористость, повысить однородность и плотность цементного камня. Замена 40 % цемента на минеральный комплекс обеспечивает достижение активности (65,2 МПа) и прочности на сжатие после ТВО (48,2 МПа), сопоставимые с белым цементом без доба-

вок (67,3 и 47,2 МПа, соответственно). Применение ПКМ «ВПП–Ан» позволяет увеличить фотокаталитическую активность вяжущего на 30 % в сравнении с образцом, полученным отдельным введением измельченного ВПП и анатаза.

Установлены закономерности влияния комплекса минеральных добавок, вводимых взамен части белого портландцемента, на свойства мелкозернистой бетонной смеси и затвердевшего бетона, его морфоструктурные особенности и способность к самоочищению, в том числе после моделирования атмосферных воздействий. Применение комплекса подходов к повышению плотности бетонной матрицы: использование нано- и микроразмерных минеральных добавок, реализация пуццолановой реакции, улучшение реологических параметров смеси введением пластификатора, оптимизация зернового состава заполнителя, обеспечивает получение самоочищающегося мелкозернистого бетона (фотокаталитическая активность не менее 67 %) с высокими декоративными и эксплуатационными характеристиками, в том числе устойчивостью к техногенным и биологическим загрязнениям в процессе эксплуатации белых тонкостенных изделий при циркуляции влаги.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о способах получения эффективных полифункциональных добавок для цементных бетонов, объединяющих пуццоланическую и фотокаталитическую активность, о процессах фазо- и структурообразования цементных систем с комплексом добавок – вспученным перлитовым песком, анатазом и микрокальцитом. Доказана эффективность использования измельченного химически активированного ВПП в качестве носителя фотокатализатора.

Разработан способ модификации вспученного перлитового песка как носителя фотокаталитического агента в системе «ВПП–Ан» для использования в качестве полифункционального компонента вяжущего, заключающийся в выдерживании исходного ВПП в течение 45 минут в 2,0 %-ом водном растворе щавелевой кислоты с последующим промыванием 0,01 %-м раствором кислоты и совместным помолом с анатазом в соотношении 1:1 в планетарной мельнице, промыванием дистиллированной водой для удаления остатков кислоты и сушкой при 70 °С.

Разработаны составы мелкозернистого бетона на основе белого цемента, при его замене до 40 %, с классами прочности до В45, водопоглощением по массе не

более 4 %, морозостойкостью до F300 для широкого спектра тонкостенных изделий, характеризующиеся устойчивостью к вымыванию водорастворимых соединений и фотокатализатора и способностью к самоочищению до 80 %.

Методология и методы исследования. Методологической основой работы послужили фундаментальные положения физико-химии цементных систем и теории структурообразования бетонов. Исследование основано на системном подходе к анализу влияния комплекса минеральных добавок на процессы фазо- и структурообразования и свойства цементного вяжущего и мелкозернистого бетона с его использованием. Экспериментальные исследования выполнены с применением комплекса современных методов анализа: рентгенофазового, дифференциальной сканирующей калориметрии, ИК-спектроскопии, растровой электронной микроскопии, низкотемпературной адсорбции азота, лазерной гранулометрии, ротационной вискозиметрии, индикаторного метода оценки активности поверхности и др. Определение физико-механических и эксплуатационных характеристик вяжущих и бетонов проводилось по стандартизированным методикам. Для оптимизации составов использован метод математического планирования эксперимента. Для моделирования атмосферных воздействий на бетон использован экстрактор Сокслета. Способность к самоочищению образцов оценивалась по степени разложения модельных загрязнителей при УФ-облучении поверхности образцов.

Положения, выносимые на защиту:

- обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение белого мелкозернистого бетона с высокими физико-механическими характеристиками и стойкостью к атмосферным воздействиям, техногенным и биологическим загрязнениям для тонкостенных изделий;
- способ модификации вспученного перлитового песка как носителя фотокаталитического агента в системе «ВПП–Ан» для использования в качестве полифункционального компонента вяжущего;
- характер влияния комплекса минеральных добавок различного генетического типа и масштабного уровня и их дозировок на свойства белого портландцемента, процессы его фазо- и структурообразования;
- закономерности влияния комплекса минеральных добавок, вводимых взамен

части белого портландцемента, на свойства бетонной смеси и мелкозернистого бетона;

– составы мелкозернистого бетона на основе белого портландцемента с комплексом минеральных добавок для самоочищающихся тонкостенных изделий. Результаты апробации.

Степень достоверности полученных результатов обеспечена применением комплекса современных взаимодополняющих методов исследования, статистической обработкой экспериментальных данных, воспроизводимостью результатов, согласованностью полученных данных с фундаментальными положениями химии вяжущих веществ и технологии бетонов и опубликованными научными результатами других исследователей.

Апробация результатов исследований. Основные положения диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских (национальных) конференциях и форумах, среди которых: VI Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы материаловедения» (Липецк, 2025); X Всероссийская научно-практическая конференция с участием молодых ученых памяти профессора О.Э. Бабкина «Инновационные материалы и технологии в дизайне» (Санкт-Петербург, 2024); Международная научно-техническая конференция «Строительство и Архитектура: Теория и практика инновационного развития» (САТРИД 2024) (Нальчик, 2024); XIV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Россия молодая» (Кемерово, 2022); Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 2021); Национальная с международным участием научно-практическая конференция студентов, аспирантов, учёных и специалистов «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе» (Тюмень, 2021); XII Всероссийская школа молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия» (Черноголовка, 2021).

Внедрение результатов исследований. Апробация разработанных составов проводилась в промышленных условиях на базе предприятий ООО «Селена» (г. Шебекино) – при выпуске опытной партии ПКМ, ООО «Мостдорстрой» (г. Белго-

род) – тонкостенных изделий. С целью внедрения результатов исследований разработаны следующие нормативно-технические документы:

- технологический регламент на производство полифункционального композиционного материала на основе вспученного перлитового песка;
- СТО 02066339-078-2024 «Самоочищающийся мелкозернистый бетон на основе белого портландцемента для тонкостенных изделий»;
- технологический регламент на изготовление самоочищающегося мелкозернистого бетона на основе белого портландцемента для тонкостенных изделий.

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлениям 08.03.01 Строительство и 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов; магистров по направлениям 08.04.01 Строительство и 28.04.03 Наноматериалы.

Публикации. Основные положения работы изложены в 13 публикациях, в том числе: 3 статьи в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованные ВАК РФ; 1 статья в издании, индексируемом в базе данных Scopus.

Личный вклад. Автором проведено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение белого мелкозернистого бетона с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками для тонкостенных изделий. Выполнен комплекс исследований, последующая обработка и анализ полученных результатов. Принято участие в апробации результатов работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 195 страницах машинописного текста, включающего 34 таблицы, 54 рисунка, список литературы из 199 источников, 7 приложений.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Рост городов и смена факторов градообразования изменяют облик архитектурного пространства и формируют новые городские объекты и центры развития инфраструктуры. Создание противоестественной визуальной среды обусловлено множеством факторов: ошибочные позиции специалистов-урбанистов, повлекшие за собой слишком кардинальные решения градостроительных вопросов, экстенсивные темпы роста городов, увеличение производства строительных материалов и рост строительной индустрии в целом, уход человека от естественного и натурального к искусственному, а также отсутствие знаний о влиянии визуальной среды на человека.

Стремительная урбанизация привела к появлению в городах множества агрессивных и гомогенных полей. Естественные природные ландшафты утрачены, современная архитектура угнетает и негативно влияет на психоэмоциональное состояние каждого городского жителя.

Научный подход в вопросах формирования современной благоприятной городской среды, а также в реконструкции уже существующих территорий, за счет использования архитектурных деталей, с применением современных строительных материалов является актуальным направлением как в архитектуре, так и в строительном материаловедении.

1.1 Тонкостенные изделия из мелкозернистого бетона

как элемент системы «человек – материал – среда обитания»

Архитектурная среда является неотъемлемым элементом целостного динамического процесса, определяющего жизненный уклад человека. Создание оптимальных условий комфорта городской среды для прогрессивного горожанина продолжает быть приоритетным направлением. При этом концепция комфорта человека, помимо социальной составляющей, включает в себя более широкий спектр факторов: планировка городской застройки, архитектурный дизайн зданий, особенности городского ландшафта [1]. Архитектурная среда функционирует как

сильный психологический фактор, воздействующий на эмоциональное состояние человека и формируя у него поведенческие реакции на бессознательном уровне [2]. Таким образом, возрастает необходимость трансформации российского градостроительства – последовательное формирование разнообразных по назначению функциональных городских зон, начиная от придомовых территорий и детских площадок и, заканчивая, масштабными общественными пространствами и городскими парками путем внедрения декоративных и функциональных бетонных изделий различного назначения.

Для усиления информационной насыщенности городской застройки архитекторы используют природные элементы (парки и скверы с растительностью), дополненные малыми архитектурными формами. Подобная организация пространства позволяет облегчить ориентацию в городской среде, повышает общий уровень жизни и комфорта, улучшает понимание масштабности окружающего мира [3–4].

Необходимо также подчеркнуть социальную роль городских парков, которая ярко проявляется через уникальность природного ландшафта, и имеет выражение через художественные, функциональные, повседневные, организованные и доступные формы проявлений. Масштабность территорий и наличие разнообразных архитектурных форм усиливают позитивный эффект от различных форм досуга на открытом воздухе. Комплексное воздействие различных видов активности – от физических упражнений до творческих занятий, дополненные созерцанием природных пейзажей и архитектурно-художественных элементов (таких как скамейки, фонтаны, скульптуры) оказывают заметное положительное влияние на человека. Научные исследования подтверждают, что отдых в пространстве, где зеленые насаждения сочетаются с конструкциями из белого бетона способствует восстановлению энергии, повышению работоспособности, улучшению жизненных показателей и снижению риска заболеваний [5–9]. В современном мире крупные офисные компании все чаще обустраивают рекреационные зоны на территории и во внутренних дворах больших офисных центров для отдыха и восстановления энергии работников.

К большому сожалению следует отметить, что в существенной части населенных пунктов не созданы необходимые условия для достойной жизни граждан. Так, в городах с маленькой численностью жителей, всплывает ряд серьезных проблем: уничтожение памятников архитектуры, плохая экология, тяжелые условия труда. Тем самым снижается необходимая комфортность проживания.

Одной из наиболее актуальных проблем можно назвать деградацию визуального облика городских территорий (рисунок 1.1). Это происходит из-за отсутствия надлежащего ухода и обслуживания изделий и конструкций, и несвоевременного проведения реставрационных работ на памятниках и исторических сооружениях, что приводит к их постепенному разрушению [10].



Рисунок 1.1 – Элементы, ухудшающие эстетический облик городской застройки

В значительной части российских городов присутствуют аналогичные неблагоприятные факторы, негативно влияющие на качество городской среды. При

этом есть населенные пункты, где инфраструктура благоустройства полностью не развита.

Улучшить визуальную составляющую городского пространства помогут: создание выразительных архитектурных форм и гармоничных силуэтов новых зданий, регулирование высотности застройки (отказ от высотных зданий в малых городах), внедрение разнообразной цветовой гаммы и контрастных решений, организация вечернего освещения, применение фасадного декора, установка малых архитектурных форм, расширение площади озеленения, применение различных видов мощения [11].

Создание комфортной городской среды является важным направлением развития, требующее системного подхода не только к формированию окружающего пространства, но и ландшафтного дизайна с профессиональным применением белого бетона и изделий из него. На первом этапе необходимо обновить уже существующие рекреационные территории (комплексная реконструкция парков и набережных), создать пространства, отвечающие интересам всех социальных и возрастных групп, восстановить зеленые насаждения и совершенствовать всю систему озеленения [12].

Специалисты в области архитектурно-эмоционального взаимодействия подчеркивают, что комфорт является значимым фактором эмоционального и информационного влияния архитектуры на человека. Однако, они отмечают, что ограничиваться критериями комфорта при формировании социальной составляющей в архитектуре нельзя. Архитектурная среда представляет собой комплексную систему условий, необходимых для жизнедеятельности людей [13, 14]. На рисунке 1.2 представлена схема создания среды, обеспечивающей комфортную жизнедеятельность человека.

Для создания гармонии и единства дизайна и архитектуры, особенно с целью отказаться от монотонности типовых панельных зданий и стандартных микрорайонов, актуально использование широкого спектра архитектурных элементов из современных строительных материалов, которые помогут сформировать задуманный стиль и настроение пространства [15].



Рисунок 1.2 – Схема создания среды, обеспечивающей комфортную жизнедеятельность человека

Существуют различные классификации тонкостенных изделий и МАФ по функциональному назначению [1, 3, 4, 14], обобщив которые можно укрупненно выделить пять видов областей использования (рисунок 1.3): мобильные сооружения, временные сооружения, декоративные объекты практического назначения, объекты утилитарного назначения, художественно-декоративные объекты. Тонкостенные изделия и МАФ находят применение во всех основных

отраслях строительства (рисунок 1.4).



Рисунок 1.3 – Области использования тонкостенных изделий и МАΦ

Так же, проведя анализ состояния современных решений по композиционно-планировочному благоустройству городских пространств можно выделить ряд предпосылок расширения применения таких изделий в градостроительных ансамблях (рисунок 1.5).

Изделия из белого мелкозернистого бетона являются важным инструментом архитектора или дизайнера, с помощью которого можно существенно повлиять на окружающий каждого человека городской, парковый или частный ландшафт.

В данном направлении существует отдельная область знания, называемая «видеоэкология», которая изучает как видимые человеком объекты воздействуют на нас своим внешним обликом. И если в естественной среде негативного влияния на физическое и психологическое здоровье практически не существует, то «городские джунгли» воздействуют крайне негативно.

Жилищное строительство	Промышленное строительство	Инфраструктурное строительство
• вентилируемые фасады • архитектурные детали • декоративные панели • лестничные ступени	• силосы • бункеры • резервуары • ограждающие конструкции	• облицовка тоннелей • шумозащитные экраны вдоль дорог • ограждения мостов

Рисунок 1.4 – Использование тонкостенных изделий в различных областях строительства



Рисунок 1.5 – Предпосылки расширения применения тонкостенных изделий и конструкций

Огромное количество зданий прямоугольных, примитивных форм, с множеством окон, серые и темные, создают неблагоприятную атмосферу, воздействуя на сознание. Важно отметить, что современный город разительно отличается от исторических центров. Обилие рекламы, вывесок, разнообразное освещение – многие эти явления вызывают отрицательные чувства и эмоции.

Нельзя не сказать о том, что близорукость у горожан встречается в 2 раза чаще, чем у жителей сельской местности, так как они вынуждены вглядываться в обилие однообразных объектов.

Развитие производства тонкостенных изделий и конструкций из мелкозернистого бетона белого цвета обусловлено необходимостью улучшения визуального восприятия городской среды и борьбой с монотонностью современной застройки. Все более актуальным становится направление внедрения участков естественной природы в районы и микрорайоны города. Подобные «оазисы» всегда сопровождаются обилием объектов малой архитектуры, которые с каждым новым подобным проектом, в стремлении разнообразить благоустраиваемую территорию, становятся все более уникальными, имеют сложные формы и текстуры.

В последние годы строительный сектор России показывает высокие темпы роста в расширении городских территорий, идет активное развитие коттеджного строительства. Современные строительные материалы все чаще и чаще используются в частной застройке, кирпичные и деревянные коттеджи отходят на второй план. Рост коттеджного строительства так же увеличивает запросы на производство тонкостенных бетонных изделий и МАФ. При этом, частный покупатель все чаще обращает внимание не на стандартные урны, беседки, скамьи, фонтаны, а пытается придать индивидуальности пространству, выбирая необычные, сделанные на заказ объекты малой архитектуры. На рисунке 1.6 представлены примеры тонкостенных изделий из бетона, гармонично вписанные в природную среду, а также, выполненные под конкретный дизайнерский проект для частного жилого дома.

Безусловно, с ростом спроса на эксклюзивные бетонные изделия растет и потребность в предании специальных свойств традиционному мелкозернистому бетону.



Рисунок 1.6 – Примеры тонкостенных изделий из белого мелкозернистого бетона

Ключевое преимущество производства тонкостенных изделий заключается в возможности создания изделий различных конфигураций, сохранив при этом высокие эксплуатационные характеристики. При грамотном подборе вяжущих компонентов и заполнителей бетон становится превосходным заменителем натурального камня, органично вписываясь как в природное окружение, так и в городской ландшафт [1–3].

1.2 Требования к свойствам растворной смеси и бетонам для производства тонкостенных изделий

Бетон, в современном строительстве, это комплексный, технологически сложный композиционный материал, который, несмотря на это, уже очень долгое

время является одним из самых популярных. Так, бетон является самым потребляемым материалом в мире после воды. Его ежегодное потребление составляет около 30 млрд. тонн, и за последние 65 лет его производство увеличилось в 10 раз (по сравнению со сталью и деревом).

Области применения бетона обширны и разнообразны, начиная от сложных несущих конструкций, которые должны соответствовать множеству показателей, и, заканчивая, малыми архитектурными формами – элементами не менее важными в построении городского пространства.

Ориентация современных планировочных решений при проектировании городской застройки на архитектурную выразительность, ставит задачи по поиску способов обеспечения не только функциональности, но и эстетичности конструкций различного назначения. Это означает, что несмотря на широкий спектр материалов, которые можно использовать для создания тонкостенных изделий и малых архитектурных форм (металл, дерево, пластик и т.д.), бетон является одним из наиболее востребованных. Это связано с сочетанием декоративности, требуемой несущей способности и долговечности (заданного эксплуатационного срока).

В современном строительстве доминирующую позицию занимают бетоны на различных модификациях портландцемента [16,17]. При производстве тонкостенных конструкций преимущественно используют цементные бетоны с вяжущим компонентом в виде обычного портландцемента, чаще всего марок ЦЕМ I 42,5 Н и ЦЕМ I 52,5 Н.

Применяемые в наше время бетонные составы полностью соответствуют строгим требованиям строительного производства, демонстрируя необходимые показатели прочности и эксплуатационно-технологические характеристики. Именно поэтому применение таких бетонов в тонкостенных конструкциях является обоснованным, так как для таких изделий важны не только прочностные характеристики, но и высокая подвижность и однородность бетонной смеси [18, 19].

В настоящее время актуальность набирает разработка новых видов бетона,

которые оптимально подходят по составу, структуре, свойствам и экономической эффективности для производства декоративных тонкостенных изделий. Такие конструкции подвержены влиянию различных атмосферных факторов, что так же необходимо учитывать. При этом бетон для подобных изделий должен отвечать ряду специфических требований: возможность применять различные методы формовки, полировка и шлифовка при необходимости. [20].

Для тонкостенных конструкций существует ряд специальных требований, которые существенно отличаются от стандартных показателей у обычного бетона (рисунок 1.7). Как уже отмечалось, архитектурно-декоративные бетоны должны соответствовать определенным критериям качества, наиболее важным из них является долговечность материала, в том числе морозостойкость. Учитывая, что тонкостенные конструкции подразумевается эксплуатировать в условиях открытых пространств, то высокие показатели морозостойкости играют ключевую роль и достигаются путем модификации микроструктуры бетонной матрицы строительного композита.

Крайне важно обеспечить повышенную плотность структуры формируемого композитного материала и минимизировать как размер, так и количество капиллярных пор. Таким образом будет достигнута высокая водонепроницаемость, что увеличит срок службы изделия.

Использование комплекса химических и минеральных добавок является одним из стандартных методов формирования оптимальной структуры бетонной смеси. Но даже этот классический метод не гарантирует полного соответствия всем необходимым техническим требованиям [21].

Суть проблемы заключается в неизменности базовой композиции материала: в ее основе все так же необходимо применять заполнители и портландцемент. Всевозможные добавки способны лишь незначительно модифицировать характеристики материала, а создание специализированных компонентов при таком подходе не производится.

Принимая во внимание исследования таких специалистов, как Ахвердов И.Н., Баженов Ю.М., Белов В.В., Лесовик В.С., Низина Т.А., Петропавловская В.Б.,

Хархардин А.Н., Черных Т.Н., Чернышев Е.М. и др., можно сделать вывод о том, что максимально соответствовать установленным требованиям могут мелкозернистые бетоны.



Рисунок 1.7 – Требования к вяжущим и бетонам для производства тонкостенных изделий и МАФ

В качестве заполнителей для таких бетонов могут использоваться вторичные ресурсы, например, отсеvy дробления горных пород [22–29]. Наибольшая шероховатость и удельная поверхность зерен отсеvов дробления способствует повышению адгезии к ним цементного камня. При этом в подобных бетонных смесях, содержащих данный заполнитель, увеличивается водосодержание, а тем самым увеличивается расход цемента, что в свою очередь приводит к ухудшению ряда технических и строительных свойств, долговечности бетона [30–32]. Важно

отметить, что конструкции из данного типа бетона эксплуатируются в условиях открытого пространства, что требует повышения требований к атмосферостойкости, и, следовательно, к увеличению расхода цемента. Снижение дозировки цемента может привести к ухудшению пластичности смеси, негативно влияя на показатели прочности и плотности материала. При этом степень карбонизации существенно различается в зависимости от влажности смеси: при уровне 55 % она значительно выше, чем при 75 % [33].

Разработана технология улучшения эксплуатационных характеристик бетона, которая заключается в предварительной обработке заполнителей специальной комплексной добавкой (гиперпластификатор и микрокремнезем). В данном методе сначала идет перемешивание части воды затворения с добавкой и заполнителями, затем – цемент и вода. Такой метод значительно повышает морозостойкость, трещиностойкость и водонепроницаемость готового бетона [34].

Также рассмотрен бетон с требуемыми для тонкостенных изделий улучшенными эксплуатационными характеристиками, армированный минерально-абразивными шламами. Изучили химический состав и коллоидно-дисперсную структуру минеральных абразивных шламов. По полученным результатам можно сделать вывод, что их введение благоприятно воздействует на механические характеристики и структурные параметры бетона, в том числе пористость, водопоглощение и прочность изделия [35, 36].

Главной особенностью тонкостенных изделий является небольшое производство, то есть сравнительно небольшой объем потребления бетона, в сравнении с массовым крупнотоннажным производством типовых железобетонных изделий. Следовательно, разработка комплексного технологического решения, которое учитывает и экономические аспекты производства и особенности производства декоративных изделий является перспективным.

Разработка материала с учетом поставленной задачи представляет собой четко сформулированный подход, который эффективно сочетается с новым перспективным направлением геоникой или геометикой, которое рассматривает

создание новых материалов сквозь систему среды обитания человека через призму используемого материала. При таком подходе, традиционные материалы проходят глубокое преобразование, раскрывающее не только их потенциал, но и новые свойства, что обеспечивает снижение расхода и экологической нагрузки.

1.3 Состав и свойства бетонов для тонкостенных изделий

Для описания бетонов, предназначенных для производства тонкостенных изделий и МАФ авторы используют такие термины как «декоративный бетон» [37–44], «архитектурный бетон» [39, 41, 45–50], «белый бетон» [51–53], «цветной бетон» [48, 54, 55]. При этом для описания составов бетона для архитектурных форм использовались понятия «белые цементы» [50, 51, 56] и «цветные цементы» [57–60].

В зарубежных публикациях такого понятия, как МАФ, нет, но, к ним относят Landscape products (Ландшафтные изделия) [11]. При этом бетоны, применение которых возможно для Landscape products фигурируют в статьях как «architectural concrete» [45, 46, 49] и «decorative colored concrete» [61].

С технологической точки зрения, основным требованием к бетонным смесям для тонкостенных изделий является высокая подвижность и уплотняемость смеси, что обеспечивает возможность придания изделию любой конфигурации и тем самым индивидуальность и эксклюзивность архитектурной формы.

Тонкостенные изделия и МАФ постоянно подвергаются специфическим негативным внешним воздействиям окружающей среды: перепадам температур и влажности, кислотным осадкам, вибрации от проезжающего транспорта и др. В этой связи для обеспечения требуемой долговечности (жизнеспособности) архитектурных конструкций, бетоны для декоративных элементов должны отвечать определенным требованиям к прочности, коррозионной и морозостойкости. Это будет обеспечивать сохранение декоративности и функциональности изделий, а именно: целостности изделия, отсутствие сколов, трещин, яркости окраски и т.д.

Необходимо отметить, что тонкостенные изделия и малые архитектурные формы из бетона в России не нормируются техническими документами и их производство регламентируется созданием технических условий (ТУ) на каждое конкретное изделие.

Несмотря на то, что существуют работы по разработке составов для таких изделий [62–76], остается ряд нерешенных вопросов, связанных с расширением линейки составов для изделий премиум-класса, повышением эксплуатационных и декоративных свойств материалов.

Таким образом, необходимо рассмотреть, с одной стороны, вопросы разработки бетонов для производства тонкостенных изделий и малых архитектурных форм в целом, и, с другой, вяжущих на основе белых цементов, как основного компонента бетонов с высоким декоративным потенциалом. Это позволит оценить перспективы и наметить пути проектирования рациональных составов с учетом имеющегося опыта использования различных видов сырьевых компонентов как для повышения эффективности, так и снижения стоимости бетонов для тонкостенных изделий.

Также был выявлен растущий с каждым годом интерес к вопросу изготовления тонкостенных изделий и МАФ. Особенно выросло количество патентов на такие изделия из бетона. Данную тенденцию можно связать с тем, что в настоящее время все большее внимание уделяется не только практическим (механическим) свойствам окружающих объектов, но и эстетической составляющей.

Кроме того, потребности в формировании изделий с индивидуальными требованиями заказчика, в частности, сложная конфигурация, особая окраска, фактура и др. – требуют разработки специальных составов бетонов, обеспечивающих вышеперечисленные характеристики как бетона, так и архитектурного объекта на его основе.

Для анализа были использованы работы, в которых изучаемое в качестве вяжущего использовались белый или цветной портландцемент (или композиция) или бетонная смесь предлагалась для производства тонкостенных изделий и малых

архитектурных форм. Данная тема узко направлена, поэтому в обзор вошли статьи и патенты не только с конкретным подбором состава бетона, но и работы, где авторы предлагают новый композиционный материал с широким спектром применения, в число которых входят и тонкостенные изделия.

Анализ результатов экспериментальных исследований (Приложение А) проводили по следующим критериям:

- вид используемого сырья;
- состав вяжущего (исходного или композиционного);
- контролируемые параметры и физико-механические свойства вяжущего;
- состав бетонной смеси;
- контролируемые параметры и физико-механические свойства бетона.

Анализ предлагаемых публикаций позволяет выделить несколько общих направлений исследований. При поиске обнаружены статьи: с разработкой состава бетонной смеси [38–43, 45, 47, 48, 51–56, 61–73], состава композиционного вяжущего [44, 49, 50, 53, 57–60, 64, 65, 67, 75] и статьи с подбором дозировки пластификатора или модифицирующей добавки [42, 43, 48, 55, 62, 71]. При этом в одной публикации может затрагиваться несколько таких направлений. На рисунке 1.8 представлена диаграмма, где наглядно можно увидеть основную направленность исследований.

В качестве вяжущих в работах используются портландцемент общестроительный [39, 51, 55, 65, 72], цветной [40, 47, 53, 55, 60, 61, 65, 67] и белый [37, 65, 69]. При этом в случае последнего в работах [39, 45, 46, 49, 51, 52, 72, 75] используется цемент зарубежных производителей. Объяснением большей частоты использования белого цемента по сравнению с другими является необходимость получения изделий широкой цветовой номенклатуры. Тем не менее, портландцемент не теряет своей популярности, так как является наиболее доступным и экономически выгодным видом цемента. Однако, даже при значительной разнице в частоте использования в составах белого и цветного цемента по сравнению с серым, упоминание в публикациях является практически одинаковым (рисунок 1.9).

Это говорит нам о том, что современные архитектурные и дизайнерские решения требуют более гибкого подхода к выбору цвета цемента.

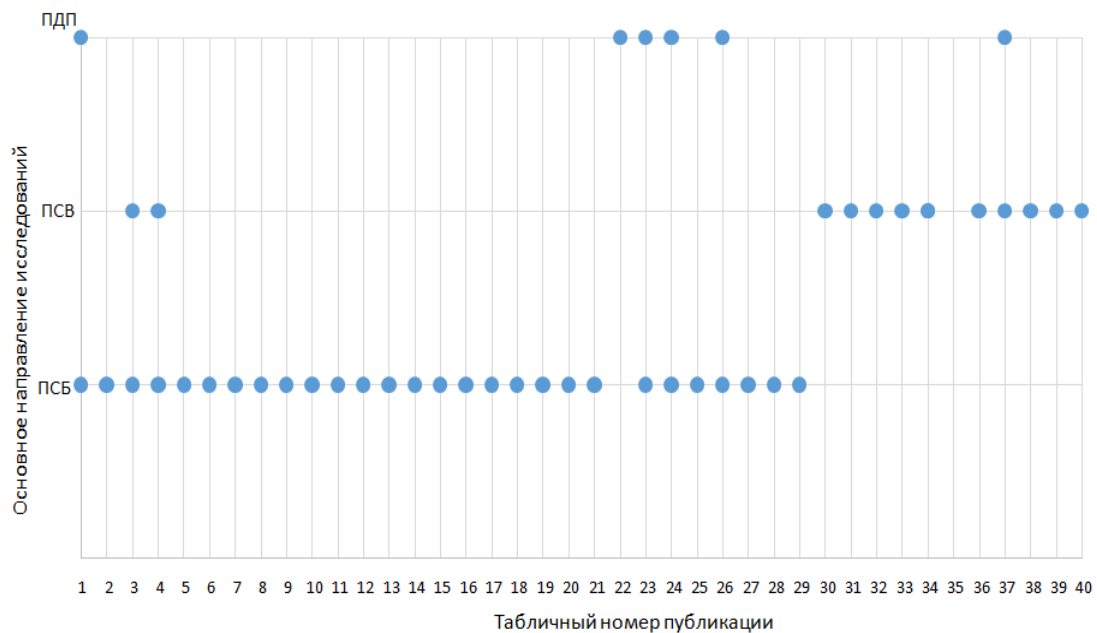


Рисунок 1.8 – Основные направления исследований проанализированных публикаций:

ПСБ – подбор состава бетона, ПСВ – подбор состава вяжущего, ПДП – подбор дозировки пластификатора или модифицирующей добавки

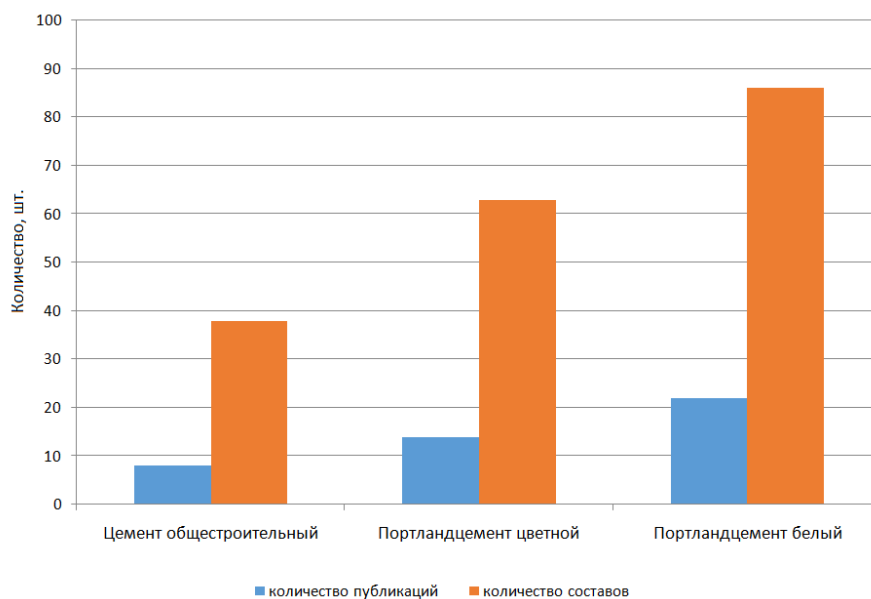


Рисунок 1.9 – Статистика по обработанным статьям и составам, представляющая использование различных видов цемента

Ввиду специфических требований к архитектурным объектам, в числе

которых высокая механическая прочность и атмосферостойкость, применение рядовых и низкомарочных бетонов при производстве тонкостенных изделий фактически невозможно. Поэтому наиболее часто в качестве вяжущего применяется белый портландцемент и серый портландцемент, типа I класс 52,5 нормально твердеющий.

Кроме того, применение пигментов для создания окрашенных бетонов требует использования высокомарочного белого цемента, производство которого в России и в мире ограничено.

Важным фактором для приготовления качественного бетона является водоцементное соотношение (В/Ц), обеспечивающее, с одной стороны, заданную подвижность смеси, а с другой – формирование цементного камня с определенной пористостью и механической прочностью.

Согласно анализа, значения В/Ц в составах, названных авторами оптимальными, колеблются от 0,25 до 0,48 (рисунок 1.10, 1.11).

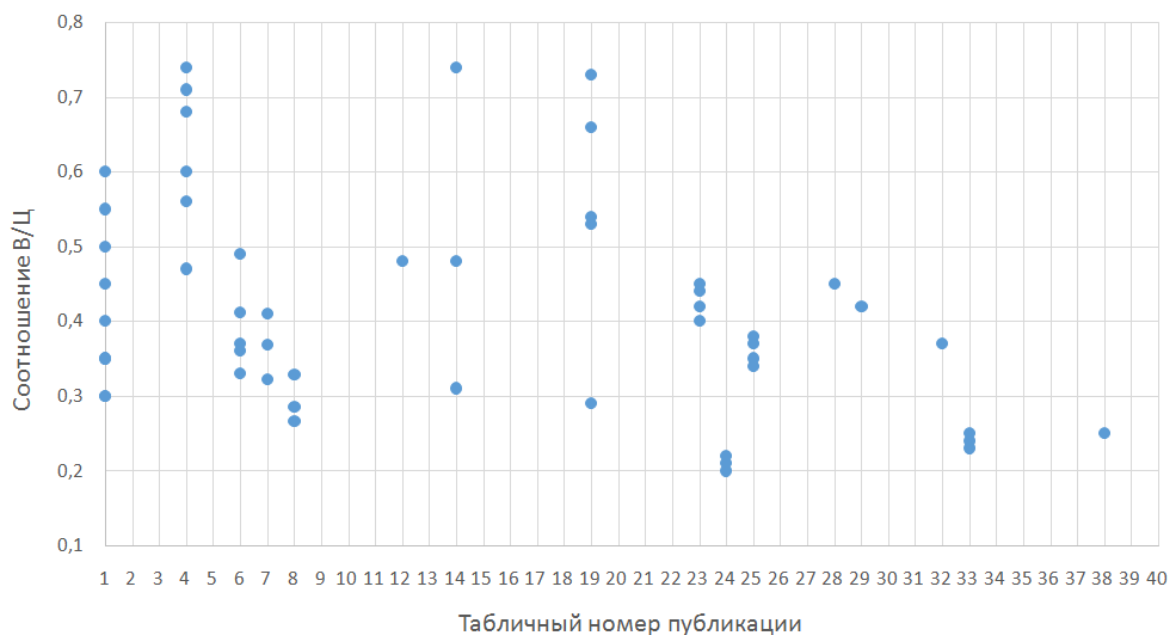


Рисунок 1.10 – Значения водоцементного отношения при подборе оптимальных составов

Очевидно, что высокое значение водоцементного отношения может стать причиной падения прочности изделий в виду существенной естественно

сформированной развитой поровой структуры.

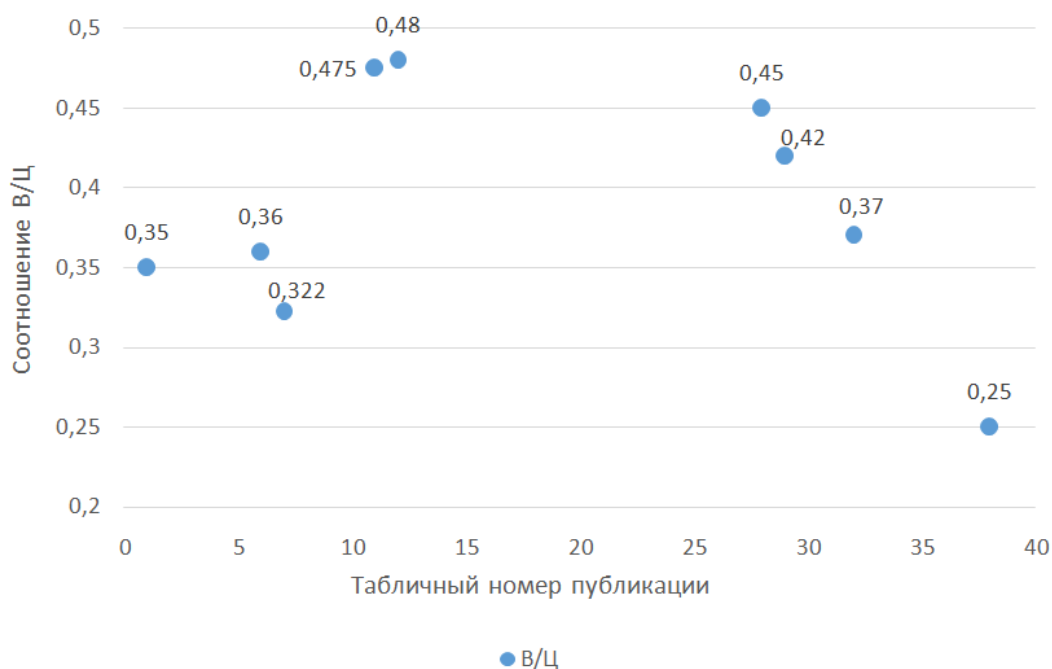


Рисунок 1.11 – Значения водоцементного отношения для бетонной смеси, указанные авторами как оптимальные

Для создания тонкостенных изделий различных конфигураций и типоразмеров необходимо обеспечение заданной подвижности и удобоукладываемости бетонной смеси, что может быть достигнуто увеличением водоцементного отношения, что приведет к падению основных физико-механических характеристик изделия. Снижение избытка воды в системе при сохранении реологических параметров бетонной смеси достигается использованием пластифицирующих компонентов различного состава. Так, наиболее часто упоминается применение супер- [37, 38, 45, 49, 51, 53, 58, 65, 71, 75] и гиперпластификаторов [40–42, 70], различных многофункциональных добавок [37, 45, 50, 54, 62, 65, 67, 69, 71].

Атмосферостойкость, коррозионная стойкость и морозостойкость, сопротивление воздействию вибраций и кислотных осадков, стойкость к перепадам влажности и температурам – важные физико-механические свойства, которые необходимо учитывать при производстве бетонных смесей для тонкостенных

изделий.

Однако, согласно анализу публикаций, исследование изменения свойств бетонов при воздействии внешних агрессивных факторов практически не рассматривается. В проанализированных публикациях можно выделить изучение пористости [71], водопоглощения [40, 45, 54, 61, 65] и морозостойкости [44, 48, 54, 64, 65, 75].

Необходимо отметить, что количественные результаты оценки основных физико-механических характеристик архитектурных изделий, авторами не раскрываются. Тем не менее, с учетом имеющихся данных, в зависимости от применяемого вяжущего, состава бетона, используемых органических и минеральных добавок, а также пластификаторов, показатели прочности на сжатие образцов вяжущего колеблются от 13,3 до 13,2 МПа, а образцов бетона от 144,0 до 9,5 МПа (рисунок 1.12), прочности на изгиб вяжущего от 12,7 до 2,9 МПа, бетона – от 19,8 до 3,1 МПа (рисунок 1.13).

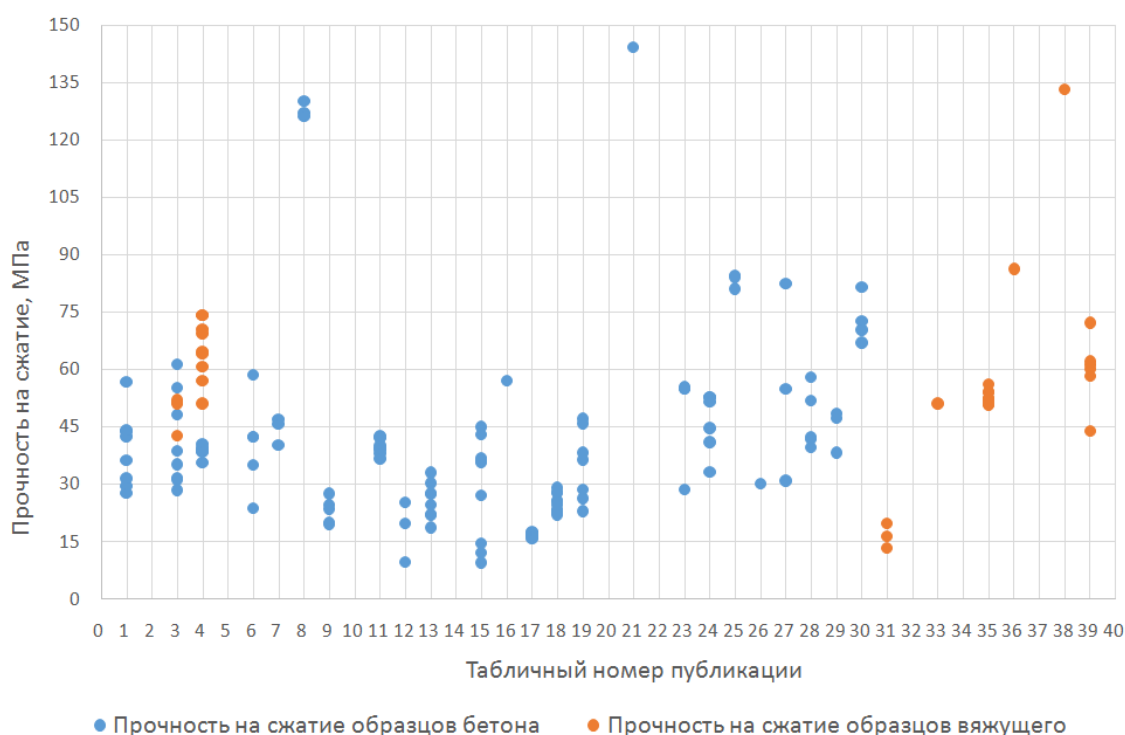


Рисунок 1.12 – Прочность на сжатие образцов вяжущих и бетонов

При этом оптимальные составы (рисунок 1.14) с позиции прочностных характеристик, отмечены лишь в некоторых публикациях [37, 38, 45, 46, 62, 64, 72,

73].

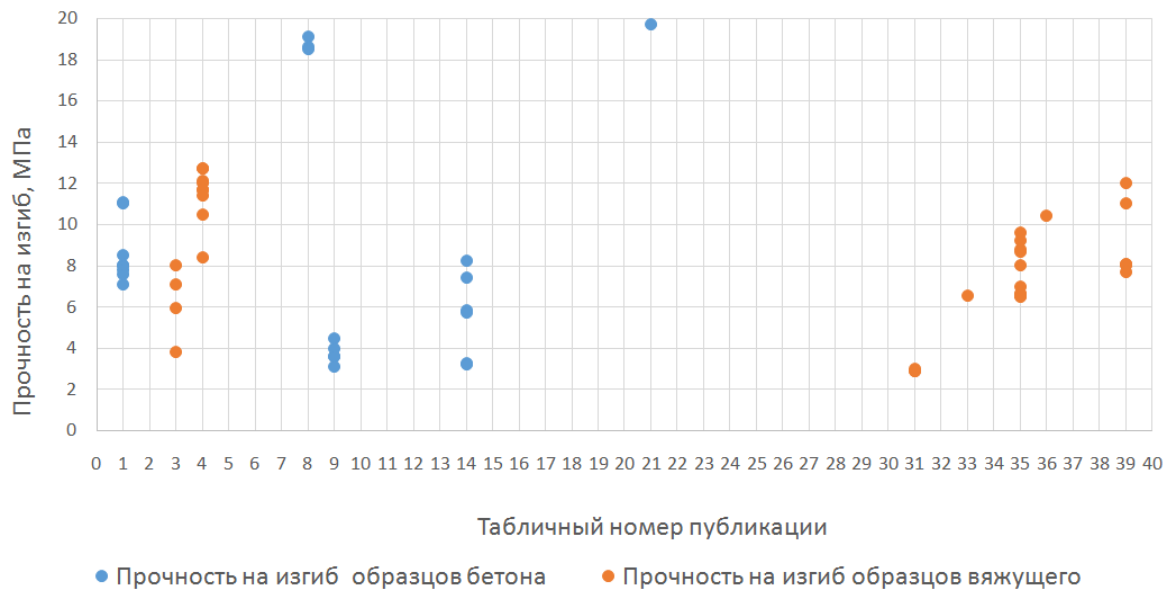


Рисунок 1.13 – Прочность на изгиб образцов вяжущих и бетонов

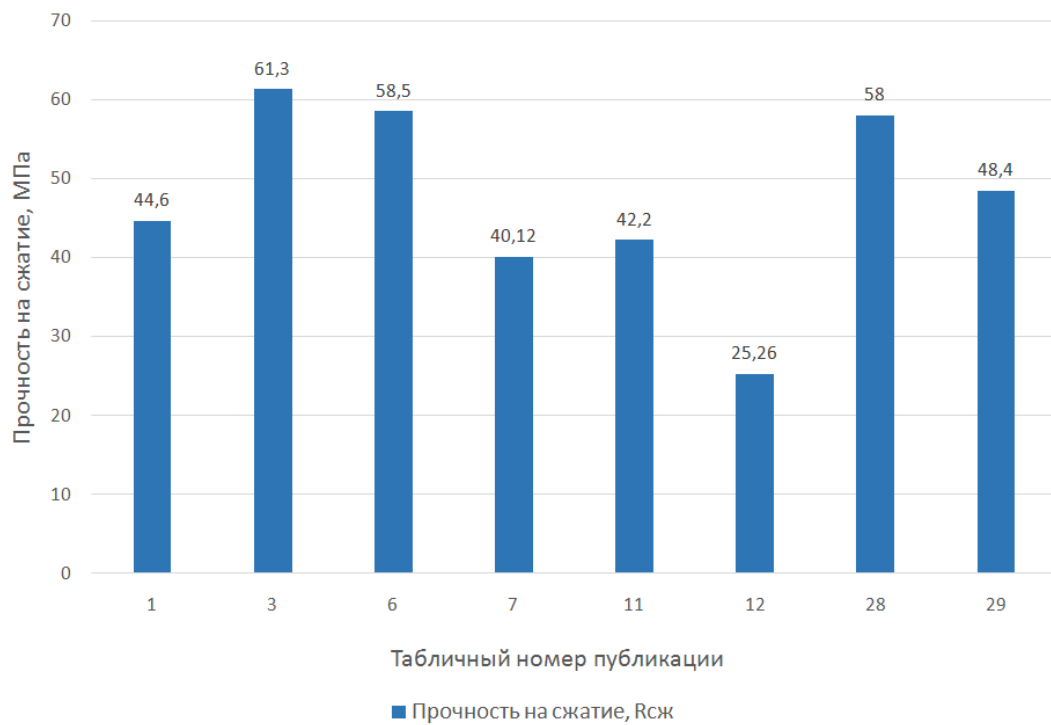


Рисунок 1.14 – Прочность на сжатие составов, указанные авторами, как оптимальные

Стоит учитывать, что ввиду различия применяемых вяжущих и составов бетонов, полученная информация носит лишь информативный характер, не

позволяя установить аналитические зависимости.

В последнее время широкое распространение получают тонкостенные изделия и малые архитектурные формы премиум-класс. Данные изделия зачастую являются уникальными и эксклюзивными, изготовленными на заказ. Их отличает использование более дорогостоящих высококачественных сырьевых материалов (белый цемент, мрамор, как наполнитель и заполнитель белого цвета, минеральные отходы промышленности, удовлетворяющие требованиям по белизне, а также напротив, горные породы, обеспечивающие заданную цветовую гамму и фактуру материала и т.д.) и различных видов модифицирующих добавок [76].

1.4 Повышение характеристик бетонов с использованием минеральных добавок

Проведенный обзор (см. главу 1.3) позволил выявить основные подходы к повышению характеристик вяжущих и бетонов для атмосферостойких тонкостенных изделий, а именно, использование пуццолановых добавок и микронаполнителей, а также фотокатализаторов, придающих способность к самоочищению [77–80]. Рассмотрим возможные к применению минеральные добавки из данных групп, имеющие белый цвет.

В качестве пуццолановой добавки белого цвета может быть рассмотрен вспученный перлитовый песок. Стекловатые породы, такие как перлит, являются вулканическими водосодержащими породами с кислым составом. В большинстве случаев количество связанной воды для подобных пород не более 2 %.

Вспученный перлитовый песок получается благодаря термической обработке такого перлитового сырья. Его использование как добавки в качестве заполнителя и наполнителя при изготовлении звуко- и теплоизоляционных изделий, и материалов, а также для бетонов различного назначения широко распространено.

Особенностью вспученного перлитового сырья является высокопоризованная структура, которая сопровождается увеличением объема и уменьшением плотности. Данный процесс обусловлен обжигом перлита при

высоких температурах, в процессе которого химически связанная вода интенсивно испаряется из обжигаемых зерен сырья. В этот период перлит находится в размягченном состоянии, а вязкость стекловидной массы значительно снижается. При этом, в зависимости от минерального и химического состава, количества воды, содержащейся в частицах и характера дегидратации вспучиваемость и характер стекловатых пород, может значительно различаться [81].

Также все более актуальным становится использование подобных минеральных добавок в качестве эффективного средства улучшения физико-механических свойств бетона. Подобные высокодисперсные вещества модифицируют матрицу цементного вяжущего.

Эффективность применения перлитового сырья в вяжущих с одновременным использованием нескольких видов цемента показана в работе [82]. Повышение прочности цементного камня объясняется введением в смешанный состав цементов на основе ПЦ 500–Д0 не более 20 % тонкомолотого перлита.

Микроструктура и свойства цементного камня формируются в присутствии применяемых добавок в процессе неоднозначного влияния нескольких факторов: дисперсности, химико-минералогического состава, активности цемента, способа введения и др.

Применение тонкодисперсного перлитового песка как пуццолановой добавки к смешанным цементам рассмотрена в работе [83]. Автором проработаны два варианта добавления тонкодисперсного перлита в цементную систему. Первый вариант – путем создания стабильной суспензии с тонкодисперсным перлитом и последующим добавлением ее в цемент. Второй вариант – сухое смешивание перлита и цемента с постепенным затворением водой и поликарбоксилатным пластификатором. Выявлено, что наибольшей устойчивостью к расслаиванию, а также агрегативной устойчивостью обладают суспензии, в которых тонкодисперсный перлит содержится в количестве 1–3 %, пластификатор 0,3–0,5 %, а также подверженный ультразвуковой обработке. Ультразвуковое воздействие обеспечивает гомогенизацию суспензии, за счет закрепления на частицах перлита тонкой дисперсии поликарбоксилатных групп проходит их стабилизация. Данный

комплексный метод стабилизации и гомегенизации такой суспензии приводит к равномерности распределения перлитовых частиц в объеме состава цемента, что ведет к более ускоренному процессу гидратации, а также увеличению физических и механических характеристик цементного камня. В первые сутки твердения таких модифицированных образцов наблюдается увеличение прочности при сжатии более чем в два раза, а в марочном возрасте на 56 %. Если сравнивать с образцом из цемента, который содержит поликарбоксилатный пластификатор, то можно наблюдать рост прочности образца в первые сутки, модифицированного суспензией на 47 % и в марочном возрасте на 19 %.

В работе [84] затронута тема использования вспученного перлитового песка при создании перлитобетона – легкого бетона, имеющий меньший вес и большим значением коэффициента передачи, по сравнению с альтернативными бетонами. При этом модуль упругости и прочность на сжатие у перлитобетона значительно ниже. При проектировании оптимального состава смеси применялся метод Тагути, позволяющий отследить целевые параметры качества всех десяти компонентов на четырех уровнях. Затем изучалось влияние перлита на долговечность и теплопроводность перлитового легкого бетона, а также исследованы механические свойства данного материала как неконструкционного бетона. Однако, даже бетон с низкими показателями прочности имеет место применения в легких бетонных конструкциях, является экологичным и энергоэффективным вариантом строительного материала. Также исследования показали, что перлитобетон должен иметь значительную осадку, чтобы предотвратить расслаивание перлита при перемешивании. В исследовании также говорится о способности бетона при напряженно-деформированном состоянии поглощать энергию в зависимости от количества вяжущих материалов, водоцементного соотношения, степени уплотнения, размера и типа заполнителя, типа нагрузки и условий отверждения. Введение дополнительных волокон стали или пропилена дает возможность укрепления таких бетонов, предотвращая внезапное разрушение при сжимающих нагрузках. Результаты, полученные в данной работе, говорят о тенденции развития энергоэффективных и устойчивых строительных материалов, полученных на

основе вспученного перлитового песка.

Влияние вспученного перлита на морозостойкость самовосстанавливающегося бетона рассмотрено в работе [85]. Вспученный перлитовый песок был использован в качестве носителя бактериальных самовосстанавливающих агентов, полученных инкапсуляционным и неинкапсуляционным методом. Данный агент непосредственно оказывал влияние на характеристики бетона и заживление трещин в условиях цикла замораживания-оттаивания. Высокая пористость и водопоглощение перлита являются отличными предпосылками для использования его в качестве бионосителя и модифицирования им строительных смесей. В работе говорится о возможности создания облицовочного материала, полученного методом, описанным выше, который защитит конструкцию от неблагоприятных внешних условий. При использовании метода частичной консолидации, когда половина вспученного перлитового песка применялась для консолидации микроорганизмов, а другая для консолидации реакционноспособных веществ, необходимых для процесса минерализации, при котором образовывалась еще одна система репарации, позволяющая понизить инфильтрационные свойства трещин.

Другим актуальным направлением является поиск эффективных путей утилизации отходов мрамора. Накопленные запасы мраморных отходов на различных предприятиях являются предпосылкой для их использования в производстве современных декоративных бетонов [86, 87].

Мрамор – метаморфическая карбонатная порода, которая образовалась путем перекристаллизации известняка и состоит преимущественно из кальцита. При первоначальном белом цвете мрамор, благодаря различным примесям, может приобретать различные оттенки и цвета. Широкий диапазон состава и структуры мрамора обуславливает варьирование его свойств, но в целом, он считается плотной и прочной породой, обладающей декоративностью, стойкой к перепадам температур и повышенной влажности. Средняя твердость мрамора обуславливает его легкую обрабатываемость, но и подверженность царапинам, истиранию, загрязнениям. Мрамор не стоек к действию кислот, что обусловлено его

карбонатным составом. Опыт эксплуатации изделий из мрамора на открытом воздухе показывает их подверженность биологическому разрушению под действием микроорганизмов и продуктов их метаболизма [88, 89]. Однако формирование вторичного кальцита в результате метаболизма определенных штаммов грибов и бактерий на кальцийсодержащем субстрате может способствовать уплотнению и упрочнению материала в результате процессов цементации и кольматации [90, 91].

Перечисленные характеристики мрамора обуславливают его широкое применение в строительстве, в том числе для обустройства городских рекреационных зон [92, 93]. Рассмотрим современные подходы к использованию мрамора различных фракций в составе декоративных минеральных вяжущих, растворов и бетонов. В зависимости от фракции мрамора, его применяют в качестве: заполнителя, наполнителя, минеральной добавки.

Например, изучена эффективность использования мрамора различного происхождения в качестве крупного заполнителя в бетонных плитах и блоках. Согласно полученным данным, такие породы как: мрамор газганский, мраморовидный известняк лондоковский, мрамор коелгинский, мраморовидный известняк саилетский, мрамор бираканский соответствуют всем требованиям, предъявляемым к заполнителям по морозостойкости, прочности и декоративности. В результате сделаны выводы о том, что для достижения повышенной плотности крупный заполнитель в виде мрамора и подобных материалов должен занимать в бетоне наибольший объем. Полученный бетон обладает монолитностью как до, так и после распиловки [94].

Показано, что использование мраморного наполнителя – тонкодисперсного порошка помогает добиться высоких прочностных характеристик композитов на основе минеральных вяжущих. Частицы мрамора заполняют пустоты между зернами мелкого заполнителя (песка), уплотняя структуру системы [95]. В системах с суперпластификатором повышение прочности достигается, в том числе, за счет обеспечения рациональных реологических характеристик системы с суперпластификатором. Такой подход приводит к созданию упорядоченной

гранулометрической и топологической структуры, позволяющей эффективнее применять водорецирующие свойства пластификаторов, так как порошки горных пород являются реологически-активными в суспензиях [96, 97]. На поверхности мрамора преобладает положительный заряд, что повышает разжижающую способность суперпластификатора С-3 [98].

При создании высокоэффективных бетонов на основе портландцемента, в которых помимо мелкого заполнителя – песка был использован тонкомолотый мраморный наполнитель, повышение в составе смеси дисперсной фазы позволило обеспечить снижение водоцементного отношения до 0,34 при значении 0,42 для контрольного состава. Доказано, что тонкодисперсная мраморная мука позволяет улучшить некоторые качественные показатели эффективности бетонов по сравнению с составом традиционной рецептуры [99].

В качестве карбонатной добавки для приготовления минерального вяжущего на основе цемента мрамор может применяться как самостоятельно, так и совместно с другими минеральными добавками. Микрокальцит – побочный продукт переработки мрамора является популярным минеральным модификатором цементного теста и камня, в том числе по причине его химического родства с производными гидратации цементного камня.

Была установлена эффективность воздействия микрокальцита как побочного продукта производства мрамора на свойства цементного камня. В цементную композицию вводилось 2,5 % от массы цемента микрокальцита, что позволило увеличить прочность цементного камня в возрасте 28 суток на 45 % [100].

Известна эффективность совместного использования в составе цементного теста микрокальцита (10 % от массы цемента) с диоксидом кремния (0,03 %). Это обеспечивает снижение водопотребности цементного теста и увеличение прочности на сжатие цементного камня на 28 суток до 75 %. С целью экономии цемента для снижения стоимости производства строительных материалов и экологического прессинга цементной промышленности автор также провел исследование возможности замены части цемента микрокальцитом. Водопотребность цементного теста по сравнению с контрольным образцом

изменилась незначительно. По результатам определения прочности на сжатие на 28 сутки установлено, что при замене до 10 % цемента микрокальцитом достигается увеличение прочности до 83 % [101].

Исследовано несколько вариантов композиционного вяжущего при различных соотношениях минеральных компонентов: цемента, золы, микрокремнезема и мрамора. Требуемая подвижность смеси обеспечивалась пластифицирующей добавкой. Прочность композиционных вяжущих определяли на ранних стадиях твердения (третьи сутки), в результате чего было установлено, что карбонатная добавка – мрамор, не оказывает влияния при прочих равных условиях на прочностные характеристики цементного камня на ранних сроках твердения [102].

При изготовлении декоративных бетонов актуально также изучение и использование цветных мраморов и мраморовидных известняков. Высокие декоративные свойства этих горных пород являются главным цветообразующим фактором при создании бетонных плит. Такие плиты зачастую используются в наружной отделке и отделке пола, а, следовательно, должны отвечать высоким эксплуатационным характеристикам. Сравнительная характеристика щебня из мрамора и мраморовидного известняка по таким параметрам как: сопротивление удару, истираемость, морозостойкость показала, что мраморовидный известняк имеет высокие показатели прочности и истираемости, в отличие от коелгинского мрамора, у которого в целом невысокие физико-механические показатели. Это согласуется с результатами определения морозостойкости. При довольно высоких показателях, мрамор изменил цвет, что недопустимо для декоративных изделий [103].

Эффективным является использование мрамора различных фракций – мраморного заполнителя в комплексе с дисперсной мраморной мукой – для достижения высокоплотной упаковки компонентов декоративного бетона [104].

Вопрос морозостойкости бетона с добавленным в него тонкодисперсным мрамором или известняком также является популярной темой для изучения. Использование в качестве микрозаполнителя бетона тонкодисперсного мрамора в

количестве 30 % положительно влияет на морозостойкость конечного продукта [105]. По результатам, полученным в исследовании, добавление такого мрамора дает сдвиг электрокинетического потенциала поверхности капилляров цементного камня в положительную сторону, что приводит к замедлению перемещения молекул воды в пористой капиллярной системе при испытании замораживанием и оттаиванием. При использовании в качестве минеральной добавки к цементу известняка повышение морозостойкости достигается за счет снижения количества моногидросульфатов алюмината кальция и повышения гидрокарбоалюминатов кальция в составе продуктов гидратации [106].

Для длительного сохранения декоративного внешнего вида бетонных изделий, эксплуатируемых вне помещений, предлагается использование фотокатализаторов и фотокаталитических композиционных материалов на их основе [107–110]. В предыдущих работах авторов БГТУ им. В.Г. Шухова фотокатализатор анатаз синтезировали золь-гель методом, что включало высокотемпературную обработку золя диоксида титана (550 °С в течение двух часов) на носителе, в качестве которого изучены: кремнеземные носители – диатомит, трепел, опока, микрокремнезем, карбонатные носители – известняк и мраморная крошка, и силикатная фибра – стеклянная и базальтовая [111–113]. В связи с высокой эффективностью фотокаталитических композиционных материалов в составе декоративных бетонов, перспективным является расширение диапазона способов их получения и сырьевых материалов.

1.5 Выводы

1. Тонкостенные изделия из мелкозернистого бетона играют важную роль в формировании комфортной городской среды. Они помогают преодолеть визуальное однообразие типовой застройки, создают благоприятную видеозэкологию и положительно влияют на психоэмоциональное состояние горожан. Растущий спрос на современные архитектурные решения, развитие инфраструктуры и малоэтажного строительства обуславливают необходимость

разработки новых составов бетонов с улучшенными эксплуатационными и эстетическими характеристиками с использованием вторичного сырья.

2. По результатам исследований российских и зарубежных авторов, работающих в направлении разработки составов вяжущих и бетонных смесей для производства тонкостенных изделий и малых архитектурных форм можно сделать вывод об актуальности выбранной тематики. Накопленный эмпирический материал, позволил провести обобщение и структурирование имеющихся данных по таким критериям, как: тип вяжущего, водоцементное отношение, вид добавки, прочность. Несмотря на существенный объем исследований, разрозненность данных в работах не позволяет установить граничные значения основных технологических и рецептурных факторов для проектирования бетона с оптимальными характеристиками. При этом обосновано, что подбор состава бетона для тонкостенных изделий должен осуществляться исходя из заданных требований, определяемых конкретными условиями и особенностями его эксплуатации.

3. Ввиду всевозрастающего спроса на архитектурные рядовые изделия, а также элит и премиум класса, которые отличают широкий ассортимент продукции с разнообразной линейкой цветов и фактур, оригинальный дизайн, высокое качество и долгий срок службы изделий, к числу основных тенденций в проектировании составов бетонов для тонкостенных изделий можно отнести: выбор сырьевых компонентов, удовлетворяющих требованиям к декоративным свойствам конечных изделий; разработка вяжущих, обеспечивающих снижение расход дорогостоящего портландцемента и оптимизацию структурообразования цементного камня на всех иерархических уровнях; подбор зернового состава заполнителей и наполнителей для обеспечения высокоплотной упаковки твердой фазы для минимизации пористости, повышения прочности и снижения проницаемости бетона; разработка смесей с высокой подвижностью для создания сложных архитектурных форм; придание изделиям способности к самоочищению, устойчивой при длительном воздействии атмосферных факторов.

4. Вспученный перлитовый песок, отходы мрамора и анатаз являются

перспективным сырьем для производства декоративных бетонов. В зависимости от фракции указанных минеральных компонентов, их можно добавлять в состав композиционных вяжущих в качестве минеральной добавки, а также использовать в качестве наполнителя, мелкого или крупного заполнителя, и самостоятельно, и в комбинации с другими минеральными добавками и заполнителями. При правильном подборе состава вяжущего и бетона можно обеспечить высокие показатели плотности, прочности и морозостойкости конечного материала. Использование вспученного перлитового песка позволяет реализовать пуццолановую реакцию в цементных вяжущих, а использование мрамора позволяет: повысить разжижающую способность пластифицирующих добавок в составе бетонной смеси, снизить себестоимость бетона при замене части цемента за счет сохранения/повышения эксплуатационных характеристик, обеспечить высокую декоративность конечных изделий. Указанные преимущества использования белых минеральных добавок в составе декоративных бетонов открывают перспективы разработки и внедрения современных архитектурных решений в городскую среду. Отмеченная проблема подверженности карбонатных материалов биологической агрессии может быть решена за счет использования фотокатализаторов, что является перспективным направлением исследования в области разработки декоративных бетонов для тонкостенных изделий.

2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологической основой работы послужили фундаментальные положения физико-химии цементных систем и теории структурообразования бетонов. Исследование основано на системном подходе к анализу влияния комплекса минеральных добавок на процессы фазо- и структурообразования и свойства цементного вяжущего и мелкозернистого бетона с его использованием.

Степень достоверности полученных результатов обеспечена применением комплекса современных взаимодополняющих методов исследования, статистической обработкой экспериментальных данных, воспроизводимостью результатов, согласованностью полученных данных с фундаментальными положениями химии вяжущих веществ и технологии бетонов и опубликованными научными результатами других исследователей.

Экспериментальные исследования проводились в лабораториях кафедр «Материаловедения и технологии материалов», «Строительного материаловедения, изделий и конструкций», «Технологии цемента и композиционных материалов», а также при использовании оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова и на базе Инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра «Наноструктурированных композиционных материалов» (ИНО и ОПЦ НКМ).

2.1 Характеристика сырьевых материалов

Для получения полифункционального композиционного материала системы «вспученный перлитовый песок – наноразмерный анатаз» использованы:

- *вспученный перлитовый песок* М100 производства ОАО «Осколснаб» г. Старый Оскол (таблица 2.1);
- *наноразмерный диоксид титана анатазной модификации* (TiO_2) (Hangzhou Wanjing New Material CO., LTD, Китай) (таблица 2.2);
- *щавелевая кислота* (Ч) производства ООО «ОдиХим» г. Москва по ГОСТ 22180–76 [114].

Таблица 2.1 – Свойства вспученного перлитового песка

Наименование показателя	Значение
Истинная плотность, кг/м ³	2400
Насыпная плотность, кг/м ³	85
Зерновой состав, мм	0,16–1,25
Влажность, % по массе	1

Таблица 2.2 – Свойства наноразмерного диоксида титана

Наименование показателя	Значение
Истинная плотность, кг/м ³	3840
Насыпная плотность, кг/м ³	420
Средний размер частиц, нм	5
Чистота, %	99,9

Для получения вяжущих смесей и мелкозернистого бетона на белом цементе использовались следующие компоненты:

– **белый портландцемент** без минеральных добавок ПЦБ 1-500-Д0 Cemix ProWhite по ГОСТ 965–89 (ООО «Цемикс», респ. Башкортостан) [115]. Химический состав и свойства белого портландцемента приведены в таблицах 2.3 и 2.4;

– **микрокальцит** (отход дробления мрамора) (ООО «МраморПро», г. Екатеринбург). Свойства микрокальцита представлены в таблице 2.5. Гранулометрический состав монодисперсного и полидисперсного микрокальцита приведен на рисунке 2.1;

– **отсев мраморный** белый фракции 0–5,0 мм (карьер г. Полевской, ООО «МраморПро», г. Екатеринбург). Данный мрамор соответствует требованиям ГОСТ 22856–89 «Щебень и песок декоративные из природного камня» [116]. Свойства мраморного отсева и гранулометрический состав приведены в таблицах 2.6 и 2.7;

– **пластификатор** Melflux 1641F на основе модифицированного полиэфиркарбоксилата, производства BASF Construction Additives Trostberg, Германия. Пластификатор представляет собой однородный светло-желтый порошок. Рекомендуемая дозировка от производителя – 0,05–0,5 % от массы вяжущего;

– **вода** водопроводная, соответствующую требованиям ГОСТ 23732–2011 «Вода для бетонов и растворов. Технические условия» [117].

Все использованные добавки соответствуют требованиям ГОСТ 24211–2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов» [118].

Таблица 2.3 – Химический состав белого портландцемента

Содержание оксидов, масс. %									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Прочие
70,43	22,30	3,27	2,91	0,33	0,16	0,1	0,26	0,15	0,09

Таблица 2.4 – Свойства белого портландцемента

Наименование показателя	Значение
Истинная плотность, кг/м ³	3100
Равномерность изменения объема, мм	3
Удельная поверхность, м ² /кг	460
Тонкость помола (остаток на сите № 008), %	0

Таблица 2.5 – Свойства микрокальцита

Наименование показателя	Значение
Истинная плотность, кг/м ³	2600
Насыпная плотность, кг/м ³	950
Содержание CaCO ₃ , %	98
Влажность, % по массе	0,2

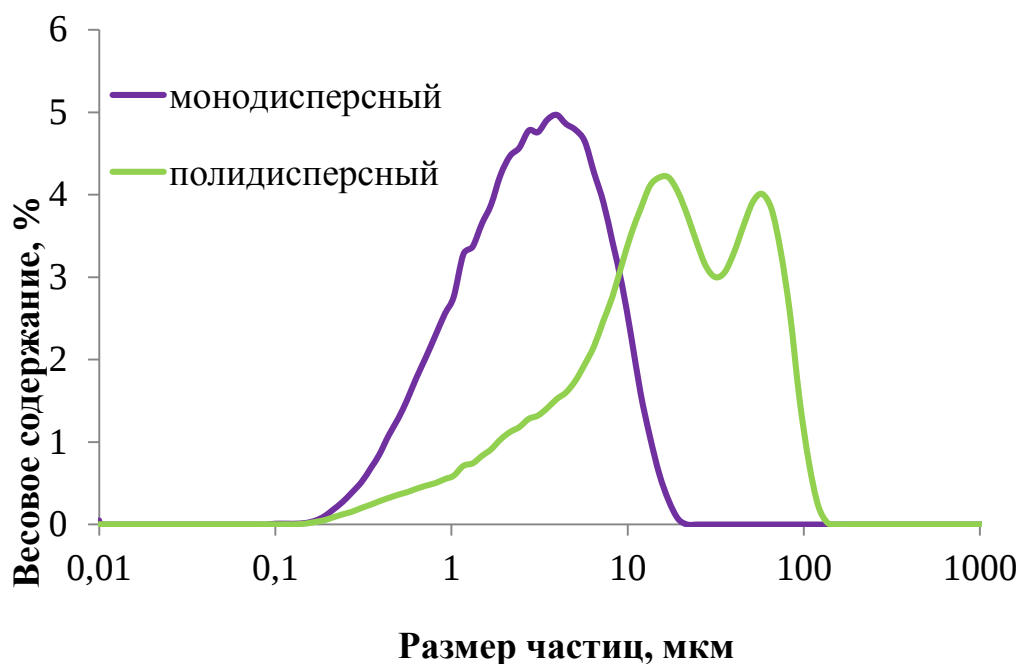


Рисунок 2.1 – Гранулометрический состав микрокальцита

Таблица 2.6 – Свойства мраморного отсева

Наименование показателя	Значение
Массовая доля ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) в пересчете на CaCO_3 , %, не менее	97,0
Массовая доля железа в пересчете на оксид железа (Fe_2O_3), %, не более	0,15
Массовая доля веществ, не растворимых в (HCl), %, не более	2,5
Твердость по шкале Мооса	3
Влажность, %, не более	0,3

Таблица 2.7 – Гранулометрический состав мраморного отсева

Размер сит, мм	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	Модуль крупности
Частные остатки, %	7,5	9,0	10,3	45,9	27,3	2,23
Полные остатки, %	7,5	16,5	26,8	72,7	100	

Для определения показателей биологического сопротивления цементного камня с добавкой вспученного перлитового песка использован модельный раствор следующего состава: уксусная кислота (концентрация 1 %) – 35 %, щавелевая кислота (концентрация 0,1 %) – 49 %, лимонная кислота (концентрация 1 %) – 16 % [119, 134].

Для оценки стойкости цементного камня к воздействию плесневых грибов применялся гриб вида *Aspergillus niger*, который обладает среди ряда исследуемых мицелиальных грибов наиболее агрессивным воздействием с высокой степенью деградационного эффекта. В соответствии с методом 4 ГОСТ 9.048–89 [120] использована суспензия спор гриба *Aspergillus niger* и питательная среда Чапека-Докса [134].

В качестве модельных загрязнителей для определения фотокаталитической активности полифункционального композиционного материала и способности к самоочищению мелкозернистого бетона использованы:

- краситель Родамин Б (Rhodamine B) производства ООО «АиС», г. Долгопрудный [121];
- олеиновая эталонная кислота производства НПО «ХимТех», г. Кемерово [122].

2.2 Методы исследования, приборы и оборудование

Исследование состава, структурных особенностей и свойств сырьевых и синтезированных материалов проводилось с использованием общепринятых в направлении материаловедения и строительного материаловедения физико-химических и физико-механических методов исследования, нормативных документов на высокотехнологичном, сертифицированном и аттестованном оборудовании с последующей статистической обработкой результатов.

Для определения **минерального и химического составов** материалов использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр серии ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции (Со-анод), рентгеновский дифрактометр

серии ARLX'TRA (Cu-анод) (Thermo Fisher Scientific); ИК-Фурье спектрометр VERTEX 70 (Bruker). Для расшифровки и обработки полученных рентгенограмм использовалось программное обеспечение WinPLOT и DifWin. The RRUFF™ Project и The Mineralogy Database – базы данных, использованные для анализа спектров.

Для изучения *микроструктурных особенностей и элементного состава поверхности* материалов применялся сканирующий электронный микроскоп MIRA 3 LMU (Tescan) с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром.

Для *помола сырья* использовалась планетарная мельница МП/4-1, производства ООО «Техно-центр», г. Рыбинск. Такие мельницы относятся к мельницам интенсивного действия, а значит позволяют получить тонкий и сверхтонкий размол, активацию, смешивание. В размольные стаканы (барабаны), которые можно снимать, загружается материал и мелющие тела, затем стаканы возвращаются в мельницу. Размольные стаканы вращаются вокруг центральной оси планетарного диска и при этом вращаются вокруг своей оси в сторону, противоположную вращению планетарного диска. Такая схема позволяет создавать перегрузки в десятки G, многократно увеличивая эффективность размола: при этом помол может осуществляться как при использовании мелющих тел (как в шаровых мельницах), так и без шаровой загрузки (в режиме самоизмельчения).

Гранулометрический анализ материалов был произведен при помощи лазерного анализатора размеров частиц ANALYSETTE 22 NanoTec Plus (Fritsch) в диапазоне от 0,08 до 2000 мкм.

Определение *удельной площади поверхности и пористости материалов* осуществляли на приборе BELSORP-miniX (MicrotracBEL Corp.) по методам БЭТ и Баррета-Джойнера-Халенды (BJH).

Пуццоланическую активность исходного и обработанного вспученного перлитового песка определяли по количеству поглощенного CaO из насыщенного раствора гидроокиси кальция при нагревании по ГОСТ Р 56593–2015 [123], а также по прочности на сжатие с использованием критерия Фишера (t-критерий)

по ГОСТ 25094–2015 [124].

Определение *кисотно-основных характеристик поверхности* исходного и обработанного вспученного перлитового песка осуществляли с использованием индикаторного метода на спектрофотометре LEKI SS-1207 (MEDIORA OY) [125].

Измерение *тепловыделения при гидратации* вяжущих смесей производили методом изотермической калориметрии на дифференциальном калориметре ToniCAL 7339 (Toni Technik Baustoffprüfssysteme GmbH). при водотвердом отношении равном 0,5.

Реологические характеристики вяжущих суспензий определяли на ротационном вискозиметре Rheotest RN4.1 (Rheotest Messgerate Medingen GmbH).

Свойства цемента и его смесей с добавками (*нормальную густоту и сроки схватывания*) определяли по ГОСТ 310.3–76 [126].

Оптимальную дозировку пластификатора определяли по методике расплыва мини-конуса [127].

Определение *прочности* цемента и его смесей с добавками проводили по ГОСТ 30744–2001 [128].

Подвижность бетонных смесей определяли по ГОСТ 10181–2014 [129].

Основные *физико-механические свойства мелкозернистых бетонов на белом цементе* определяли по стандартным методикам:

- прочность на сжатие по ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» [130];

- водопоглощение по ГОСТ 12730.3–2020 «Бетоны. Метод определения водопоглощения» [131];

- объем открытых капиллярных пор по ГОСТ 12730.4–2020 «Бетоны. Методы определения параметров пористости» [132];

- морозостойкость – ГОСТ 10060–2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» [133].

Для оценки *показателей биологического сопротивления* цементного камня с добавкой вспученного перлитового песка использовали два подхода [134]:

1) экспозиция образцов в модельной среде (смеси органических кислот), имитирующей продукты метаболизма микроорганизмов, по методике испытания строительных материалов на биостойкость [119];

2) заражение образцов суспензией спор грибов, согласно методам лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов [120, 135].

Для определения *фотокаталитической активности* полифункционального композиционного материала и *способности к самоочищению* мелкозернистого бетона использованы:

1) метод оценки удаления родамина Б по UNI 11259:2016 [121, 136];

2) метод измерения изменения краевого угла смачивания на поверхности фотокаталитического бетона под воздействием ультрафиолетового излучения по ГОСТ Р 57255–2016 «Бетоны фотокаталитически активные самоочищающиеся. Технические условия» [122] с использованием прибора для измерения краевого угла смачивания KRUSS DSA30 (KRÜSS GmbH).

Моделирование атмосферных воздействий на мелкозернистый бетон осуществляли с использованием экстрактора Сокслета [137, 138].

Экстрактор Сокслета представляет собой классическую лабораторную установку для непрерывной экстракции, состоящую из трех основных элементов:

1. Круглодонная колба – резервуар для растворителя (в нашем случае – дистиллированной воды).

2. Экстракционная камера с сифонной трубкой – рабочая зона размещения образцов.

3. Обратный холодильник – конденсатор паров растворителя.

Образцы мелкозернистого бетона (кубы 20×20×20 мм) после тепловлажностной обработки (при 85 °С по режиму 3+6+2 ч) помещали в экстракционную камеру. В колбу заливали дистиллированную воду. При нагревании колбы вода испарялась, пары поднимались по боковому патрубку в холодильник. В холодильнике пары конденсировались, и дистиллированная вода капала на образцы бетона. При достижении уровня перелива сифонной трубки вся

накопленная жидкость с растворенными веществами сбрасывалась обратно в колбу. Процесс автоматически повторялся (продолжительность одного цикла составляла около 3 часов). В процессе моделирования каждые 24 часа измеряли pH инфильтрата.

В качестве измеряемых параметров выступили:

– потеря массы образцов, %:

$$\Delta M = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \cdot 100 \%, \quad (2.1)$$

где M_0 – начальная масса образцов, г, M_1 – масса после экстракции, г;

– снижение прочности, %:

$$\Delta R = \frac{R_0 - R_1}{R_0} \cdot 100 \%, \quad (2.2)$$

где R_0 – начальная прочность образцов, МПа, R_1 – прочность после экстракции, МПа.

2.3 Выводы

1. Методологической основой работы являются результаты прикладных и фундаментальных исследований зарубежных и отечественных ученых в области получения фотокаталитических композиционных материалов, цементных вяжущих и атмосферостойких мелкозернистых бетонов. Для анализа сырьевых материалов и бетонов на их основе использовался комплекс методов исследования с применением высокотехнологичного современного оборудования, что позволило получить достоверные и обоснованные результаты. Для исследований и испытаний сырьевых и синтезированных материалов в данной работе применяли оборудование кафедр «Материаловедения и технологии материалов», «Технологии цемента и композиционных материалов», «Строительного материаловедения, изделий конструкций» и «Центра высоких технологий» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.

2. В качестве белых сырьевых материалов в работе использовали: белый портландцемент без минеральных добавок ПЦБ 1-500-Д0 Cemix ProWhite (ООО «Цемикс», респ. Башкортостан); вспученный перлитовый песок М100 (ОАО «Осколснаб», г. Старый Оскол); наноразмерный диоксид титана анатазной модификации (TiO_2) (Hangzhou Wanjing New Material CO., LTD, Китай); микрокальцит (отход дробления мрамора) и отсев мраморный белый фракции 0–5,0 мм (ООО «МраморПро», г. Екатеринбург); пластифицирующая добавка Melflux 1641 F (BASF Construction Additives, Германия).

3. Экспериментальные исследования выполнены с применением комплекса современных методов анализа: рентгенофазового, дифференциальной сканирующей калориметрии, ИК-спектроскопии, растровой электронной микроскопии, низкотемпературной адсорбции азота, лазерной гранулометрии, ротационной вискозиметрии, индикаторного метода оценки активности поверхности и др. Определение физико-механических и эксплуатационных характеристик вяжущих и бетонов проводилось по стандартизированным методикам. Для оптимизации составов использован метод математического планирования эксперимента. Для моделирования атмосферных воздействий на бетон использован экстрактор Сокслета. Способность к самоочищению образцов оценивалась по степени разложения модельных загрязнителей при УФ-облучении поверхности образцов.

3 СОСТАВ И СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОЙ СИСТЕМЫ С КОМПЛЕКСОМ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК

При проектировании городских рекреационных зон архитекторы и дизайнеры отдают предпочтение использованию экологичных строительных материалов светлых оттенков. Актуальность приобретают подходы, позволяющие получать бетонные изделия сложных форм, тонкостенные, прочные и устойчивые к атмосферным воздействиям, способные сохранять декоративный вид в процессе эксплуатации, при максимальном вовлечении в их производство техногенного (вторичного) минерального сырья, например, вскрышных и вмещающих горных пород, хвостов обогащения, побочных продуктов производственных процессов и др. Проблема заключается в том, что при необходимости получения изделий белого цвета диапазон возможного сырья резко сокращается. Также в связи с экологической обстановкой необходимым является снижение содержания портландцемента в бетонах. В связи с этим, актуальной является разработка современных вяжущих и бетонов с пониженным содержанием портландцемента на основе минеральных компонентов белого цвета.

3.1 Концепция дизайна исследования для проведения сегментированного эксперимента

Проведенный анализ научной литературы, выявление имеющихся проблем и существенных задач перед исследователями в области технологии производства мелкозернистых бетонов, вяжущих на белом цементе, а также современных исследований касающихся области создания тонкостенных изделий из бетона и опыта их производства, были обобщены и обозначены в технологические проблемы и в пути их возможного решения (рисунок 3.1), применение которых впоследствии способно: повысить эффективность производства мелкозернистых бетонов, долговечность получаемых изделий и улучшить архитектурный облик городской среды.

РАЗРАБОТКА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА ДЛЯ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ		
ПРОБЛЕМЫ	СПОСОБЫ РЕШЕНИЯ	РЕЗУЛЬТАТ
Высокая стоимость белого портландцемента и углеродный след мировой цементной промышленности	Частичная замена белого портландцемента на минеральные добавки, в т.ч. побочные продукты промышленности	Снижение себестоимости изделий. Снижение углеродного следа. Расширение сырьевой базы для производства мелкозернистого бетона.
Необходимость получения белых и светлоокрашенных бетонных изделий и конструкций для формирования благоприятной архитектурной среды	Применение вяжущих, минеральных добавок, наполнителей и заполнителей белого цвета	Изделия имеют высокие декоративные характеристики. Возможность получения изделий широкий палитры цветов.
Повышение водопотребности вяжущего при применении тонкодисперсных минеральных добавок	Контроль реологических параметров вяжущего за счет рационального использования минеральных и пластифицирующих добавок	Повышение удобоукладываемости смеси без увеличения расхода воды затворения для получения тонкостенных изделий сложной формы
Потеря декоративного внешнего вида при длительной эксплуатации в результате техногенных и биологических воздействий	Применение фотокатализатора, закрепленного на минеральной добавке	Изделия имеют способность к фотокаталитическому самоочищению поверхности от органических загрязнений, устойчивую к внешним воздействиям среды (выветриванию)
Сложность достижения высоких эксплуатационных характеристик и долговечности при получении тонкостенных изделий сложной формы	Управление гранулометрическим составом компонентов на нано-, микро- и макроуровнях мелкозернистого бетона для создания высокоплотной структуры	Изделия имеют высокую прочность и морозостойкость, пониженное водопоглощение, устойчивость к атмосферным воздействиям и биологической агрессии

Рисунок 3.1 – Проблемы и способы повышения эффективности мелкозернистых бетонов для тонкостенных изделий

Решением специфичных задач для бетонов, предназначенных для создания тонкостенных изделий, таких как обеспечение: высокой устойчивости к атмосферным воздействиям; сложной формы изделий, достижение которой требует хорошей удобоукладываемости смеси и высокой прочности матрицы, является разработка и использование вяжущего на основе белого портландцемента и минеральных добавок белого цвета, обеспечивающего снижение расхода цемента при сохранении реологических параметров вяжущей композиции и физико-механических характеристик затвердевшей системы. Для придания способности к самоочищению с целью сохранения декоративного внешнего вида на длительный срок при агрессивных воздействиях окружающей среды целесообразным может быть использование фотокаталитической добавки с предварительным ее закреплением на одном из компонентов вяжущего. Целями предварительного закрепления являются: минимизация выкрашивания (выветривания) фотокатализатора с поверхности, повышение равномерности распределения фотокатализатора в поверхностном слое изделия, способность к самоочищению последнего. С учетом того, что при получении бетонов нового поколения, в том числе декоративного назначения, основной целью является обеспечение высокой плотности матрицы при высоком отношении прочности к массе и пониженном содержании портландцемента, целесообразным предполагается управление гранулометрическим составом компонентов на нано-, микро- и макроуровнях мелкозернистого бетона для создания высокоплотной структуры.

Для решения существующих проблем и поставленных на их основе задач предлагается использовать комплекс мер:

- снижение расхода белого портландцемента;
- использование пуццолановой добавки белого цвета;
- предварительное закрепление фотокатализатора на частицах пуццолановой добавки;
- использование тонкодисперсного отхода обработки мрамора (микрокальцита) для контроля реологических параметров и пористости цементной матрицы;

– использование высокоплотной упаковки заполнителя белого цвета – отхода обработки мрамора.

Предполагается, что представленный комплекс мер, складывающийся в технологическое решение, обеспечит возможность получения белого мелкозернистого бетона с высокими физико-механическими характеристиками и стойкостью к атмосферным воздействиям за счет пуццолановой реакции, снижения капиллярной пористости, физико-химического закрепления фотокатализатора в цементно-песчаной матрице.

Таким образом, **рабочей гипотезой** данного исследования в рамках представленной диссертационной работы стало предположение о том, что улучшение свойств (удобоукладываемости, прочности, способности к самоочищению, долговечности) мелкозернистого бетона для светлых тонкостенных изделий при пониженном расходе белого портландцемента может быть достигнуто за счет: синергизма кремнеземного (вспученный перлит) и карбонатного (микрокальцит) компонентов при рациональном их гранулометрическом составе и количественном содержании по отношению к вяжущему; предотвращения вымывания наноразмерного фотокатализатора в процессе эксплуатации изделий путем его предварительного закрепления на частицах кремнеземного компонента вяжущего.

Совместный помол портландцемента с минеральными добавками рассмотрен в работе не будет, т.к. не является экономически и энергетически целесообразным.

Разработанный дизайн эксперимента для подтверждения рабочей гипотезы был составлен с учетом поэтапного исследования характеристик разрабатываемых материалов в зависимости от сегмента исследования (рисунок 3.2.). Конечным продуктом исследования станет мелкозернистый бетон для тонкостенных изделий с использованием вяжущего на основе белого цемента с добавлением кремнеземного компонента – вспученного перлита, карбонатного компонента – микрокальцита, фотокатализатора – диоксида титана. Декомпозиция данной исследовательской работы выглядит как четыре этапа, которые логически продолжают друг друга.

Этап I. Подготовка вспученного перлитового песка (ВПП) как полифункционального компонента белого вяжущего	
Показатель	Метод
Размолоспособность ВПП (кинетика помола)	Лазерная гранулометрия
Распределение TiO_2 на поверхности ВПП	Растровая электронная микроскопия
Наличие связей Ti-O-Si	ИК-спектроскопия
Пуццоланические свойства	Определение количества поглощенного СаО по ГОСТ Р 56593-2015
	Индикаторный метод
	Статистическая оценка значимости различий прочности на сжатие по ГОСТ 25094-2015
Фотокаталитическая активность	Оценка изменения цвета органического красителя
Этап II. Оценка влияния комплекса добавок на свойства цементной системы	
Показатель	Метод
Зависимость прочности от содержания и гранулометрического состава компонентов	Факторный эксперимент
Нормальная густота и сроки схватывания	ГОСТ 30744-2001
Подбор пластифицирующей добавки	Метод мини-конуса
Реологические характеристики	Метод ротационной вискозиметрии
Теплота гидратации	Метод изотермической калориметрии
Прочность	ГОСТ 30744-2001
Особенности фазообразования	Рентгенофазовый анализ
Особенности структурообразования	Растровая электронная микроскопия
Нано-пористость	Метод низкотемпературной адсорбции азота

Рисунок 3.2 – Декомпозиция дизайна проведения исследования

Этап III. Разработка состава белого мелкозернистого бетона

Показатель	Метод
Оптимизация гранулометрического состава сухих компонентов бетонной смеси	Расчет эталонной функции по уравнению Функа-Дингера
Удобоукладываемость бетонной смеси	ГОСТ 10181-2014
Прочность	ГОСТ 18105-2018, ГОСТ 10180-2012
Плотность	ГОСТ 12730.1-2020
Пористость	ГОСТ 12730.4-2020

Этап IV. Изучение атмосферостойкости белого мелкозернистого бетона для самоочищающихся тонкостенных изделий

Показатель	Метод
Водопоглощение	ГОСТ 12730.3-2020
Морозостойкость	ГОСТ 10060-2012
Устойчивость к вымыванию водорастворимых соединений при моделировании атмосферных процессов в экстракторе Сокслета	Контроль pH экстрагента и массы образцов
Способность к самоочищению после моделирования атмосферных процессов	Оценка изменения цвета органического красителя
	Оценка изменения краевого угла смачивания по ГОСТ Р 57255-2016

Рисунок 3.2 – Декомпозиция дизайна проведения исследования (Окончание)

Объектом исследования на первом этапе сегментированного эксперимента являлась система «вспученный перлитовый песок – наноразмерный диоксид титана» (ВПП–Ан) как компонент вяжущего. Для приведения исходного полифракционного вспученного перлитового песка к гранулометрическому составу, близкому к цементу, в процессе измельчения производилось определение распределения частиц по размеру. На основе кинетики помола произведена оценка размолоспособности с целью снижения энергозатрат на измельчение добавки и раскрытия экономического потенциала данного песка. Для обеспечения закрепления частиц диоксида титана на поверхности перлита предполагается предварительная активация последнего путем кислотной обработки. Для полученных систем «ВПП–Ан» были изучены: гранулометрический состав, микроструктурные особенности и морфология поверхности, состав химических связей, а также пуццоланические свойства и фотокаталитическая активность. Полученные результаты позволили установить способ и режим подготовки вспученного перлитового песка, и получения на его основе добавки системы «ВПП–Ан» как эффективного пуццоланового и фотокаталитического компонента вяжущего.

Объектом исследования на втором этапе сегментированного эксперимента являлось вяжущее, состоящее из следующих компонентов: белый портландцемент, добавка ВПП–Ан, микрокальцит, пластифицирующая добавка. При варьировании содержания и гранулометрического состава указанных компонентов оценивались характеристики цементного теста и цементного камня: нормальная густота и сроки схватывания, реологические параметры, теплота гидратации, особенности фазо- и структурообразования, в т.ч. параметры пористости затвердевшей системы. Полученные результаты позволили разработать состав вяжущего, где часть белого портландцемента заменена на пуццолановый и карбонатный компоненты, при сохранении реологических характеристик цементного теста и прочности получаемого цементного камня.

Объектом исследования на третьем и четвертом этапах сегментированного эксперимента являлся мелкозернистый бетон на основе разработанного вяжущего,

предназначенный для получения атмосферостойких тонкостенных изделий белого цвета.

При разработке состава бетонной смеси на третьем этапе сегментированного эксперимента помимо традиционных правил подбора, нормированных ГОСТ 27006–2019, применен метод оптимизации гранулометрического состава наполнителей и заполнителей – расчет эталонной функции по уравнению Функа-Дингера с целью обеспечения высокоплотной упаковки компонентов бетона. Для подтверждения подбора рационального состава бетонной смеси, обеспечивающего в том числе достижение высокоплотной структуры мелкозернистого бетона, и соответственно, высокие физико-механические характеристики, определяли: удобоукладываемость бетонных смесей и эксплуатационные характеристики бетона.

На четвертом этапе были изучены особенности поведения разработанного бетона при циклической фильтрации воды. Атмосферостойкость косвенно оценивалась по комплексу следующих показателей: водопоглощение, морозостойкость, устойчивость к вымыванию водорастворимых соединений. Также проведена оценка сохранения способности к самоочищению разработанного бетона после моделирования процессов выветривания для подтверждения эффективности предварительного закрепления фотокатализатора – диоксида титана анатазной модификации на частицах вспученного перлитового песка.

Таким образом, разработанный дизайн сегментированного эксперимента включает в себя четыре основных этапа, каждый из которых базируется на комплексном анализе системы «состав – структура – свойства. Эксперимент состоит из следующих этапов: подготовка вспученного перлитового песка как компонента полифункционального композиционного материала; определение влияния комплекса минеральных добавок на свойства цементной системы; разработка состава мелкозернистого бетона; изучение атмосферостойкости мелкозернистого бетона. Декомпозиция исследования по разработке мелкозернистого бетона на основе белого цемента для тонкостенных атмосферостойких изделий позволила систематизировать и оптимизировать

процесс эксперимента, пробоподготовку, использование исследовательского оборудования и сырьевых материалов.

3.2 Модификация (подготовка) вспученного перлитового песка как полифункционального компонента белого вяжущего

В производстве современных эффективных строительных материалов в последние годы отмечаются новые тенденции. Как производители, так и потребители обращаются в сторону рационального потребления природных ресурсов, особое внимание уделяется переработке промышленных отходов, поиску путей снижения энергоемкости производства, то есть при разработке, проектировании и внедрении в производство композитов, наряду с экономической рассматривается и экологическая сторона. В то же время, к современным строительным материалам предъявляется множество требований, соответствующих высокому уровню развития технологий, такие как: повышенная прочность, удобоукладываемость, морозостойкость, коррозионная стойкость, способность к самоочищению и т.д. Обеспечить соответствующий уровень всех перечисленных выше характеристик позволяет разработка многокомпонентных систем, в которых осуществляется управление процессами фазо- и структурообразования при рациональном подборе сырьевых компонентов, в т.ч. современных добавок, а также побочных продуктов и отходов промышленности [139–146].

В современной строительной индустрии расширяется производство и использование вяжущих систем с пониженным расходом портландцементного клинкера, в которых часть клинкера заменяют на минеральные добавки различного происхождения. Такие вяжущие обладают повышенными показателями экологичности и эффективности, за счет применения в них либо отходов производства, либо местных материалов, при этом, имея сниженную энергоемкость и стоимость, сохраняют свои эксплуатационные характеристики за счет рационального проектирования состава и использования химических добавок.

Особенно актуально использование подобных высокотехнологичных вяжущих для получения нерядовых декоративных и архитектурных бетонов, применение которых возможно в производстве тонкостенных изделий, а также в любых других нетиповых изделиях (сложная конфигурация, окрашивание, офактуривание и т.д.) [147–154].

Специфика белого портландцемента (высокая степень белизны) существенно сокращает спектр минеральных добавок, в том числе пуццолановых, которые могут быть использованы в составе вяжущего, поскольку изменение цвета бетона приведет к снижению эстетической выразительности изделий. Использование минеральных добавок, наполнителей и заполнителей, цвет которых значительно отличается от белого совместно с белым цементом является экономически нецелесообразным, т.к. стоимость последнего выше, чем у серого портландцемента за счет повышенных требований к составу сырья и более высокой температуры спекания клинкера. В этой связи по первичным критериям (цвет и «генетически заложенная» активность) в качестве одной из добавок к вяжущему, вводимой взамен части цемента, предлагается рассмотреть вспученный перлитовый песок [155, 156, 158].

Использование вспученного перлита в составе цементных материалов более известно в качестве легкого наполнителя и заполнителя [153–159], его применению в качестве пуццолановой добавки и носителя фотокатализатора не уделяется значительного внимания в литературе. В связи с чем целью данного этапа работы стала оценка возможности использования вспученного перлитового песка как активной (пуццолановой) добавки к белому портландцементу путем изучения комплекса его свойств, зависимости данных свойств от способа подготовки (активации поверхности), установление влияния его состава и типоморфных особенностей на свойства цементной системы.

Химический состав перлитового песка представлен преимущественно оксидами кремния и алюминия (таблица 3.1). На рентгеновской дифрактограмме (рисунок 3.3) помимо рентгеноаморфной фазы (широкая область), отмечаются пики кварца, минералов группы полевых шпатов (плагиоклазов ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ –

$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) и калиевых полевых шпатов ($\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] - \text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] - \text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$), минералов группы слюд подгруппы биотита ($\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}][\text{OH}, \text{F}]_2$) [160].

Принятый к исследованию вспученный перлитовый песок по зерновому составу (см. главу 2) в соответствии с ГОСТ 10832–2009 относится к вспученному песку мелкому (от 0,16 до 1,25 мм) и состоит из частиц круглой формы белого цвета. Выбор мелкого песка обусловлен необходимостью снижения затрат на помол, который осуществляется с целью приведения размера частиц к близкому с цементными и меньшему.

Таблица 3.1 – Химический состав вспученного перлитового песка

Оксиды	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	Fe_2O_3	MgO	SO_3	MnO	TiO_2	Прочее
Содержание, %	74,08	14,38	4,49	4,42	1,20	0,64	0,23	0,08	0,08	0,07	0,33

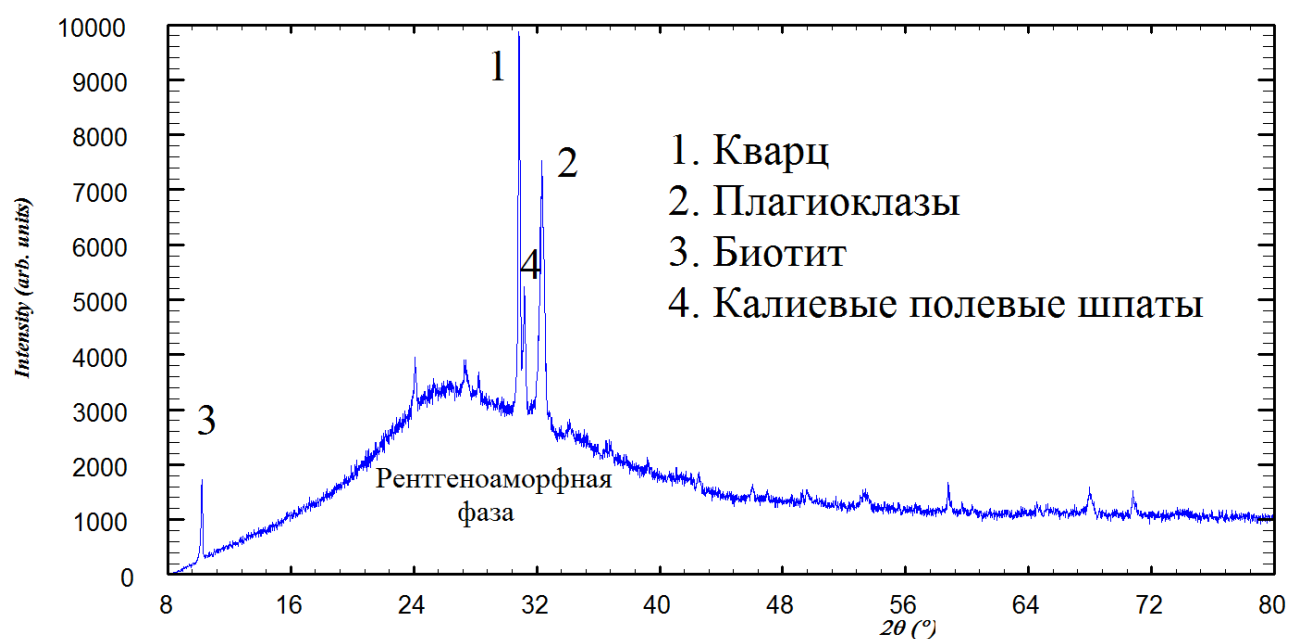
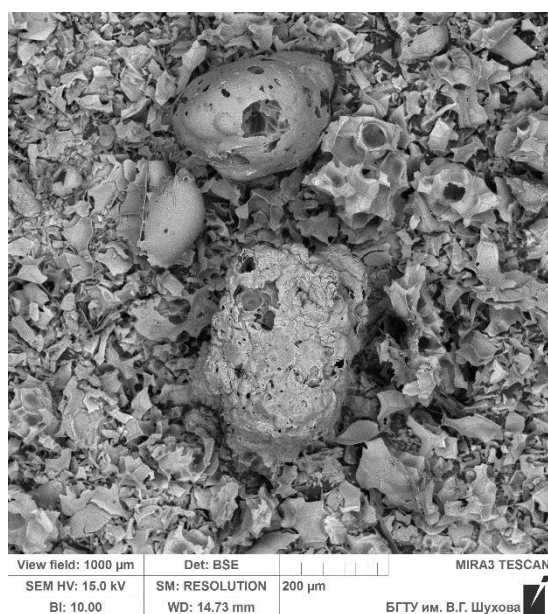


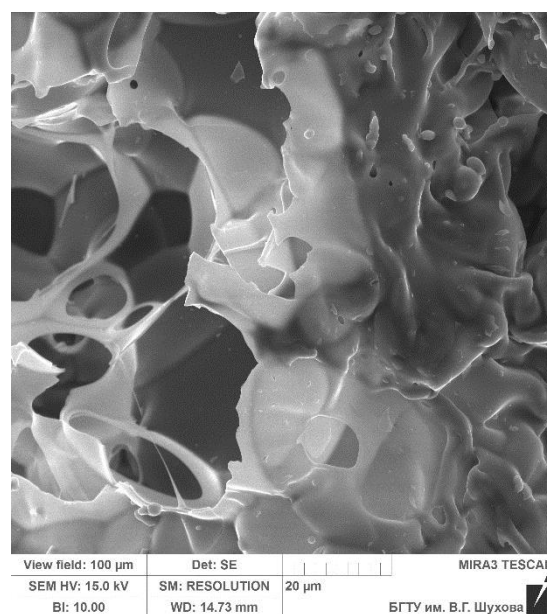
Рисунок 3.3 – Дифрактограмма вспученного перлитового песка

Выбор именно вспученного перлита, а не породы в естественном виде (перлит), обусловлен особенностями структуры продукта термической обработки, а именно высокой пористостью, что является важным параметром для материала, выступающего носителем фотокатализатора [161].

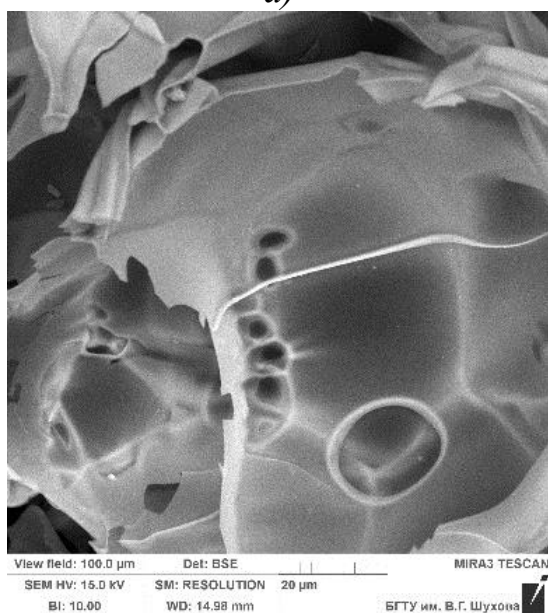
С использованием метода растровой электронной микроскопии были исследованы морфология поверхности и форма частиц вспученного перлитового песка (рисунок 3.4). Вспученный перлитовый песок сложен зернами округлой формы с неупорядоченной открытопористой структурой по всему объему зерен (рисунок 3.4, а). Поры имеют неправильную форму близкую к шарообразной и широкий диапазон размеров от 1 до 100 мкм (рисунок 3.4, б, в). В пробе отмечается значительное количество осколков межпоровых перегородок. Поверхность межпоровых перегородок гладкая, имеет толщину около 1 мкм (рисунок 3.4, г).



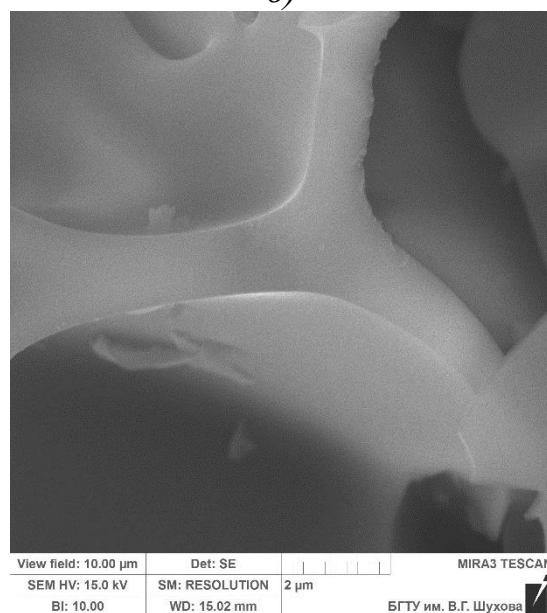
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.4 – Микроструктурные особенности вспученного перлитового песка

Пустотелое строение внутренней структуры зерен обусловлено процессом расширения и вспенивания исходной породы при термической обработке, в результате чего полученные частицы имеют высокую впитывающую способность [162]. Последнее затрудняет использование вспученного перлитового песка в цементных системах, что потребует принятия дополнительных мер для нивелирования высокой водопотребности смеси – использования пластифицирующей добавки и микрокальцита, как регулятора реологических параметров смеси.

Вспученный перлитовый песок измельчали в шаровой планетарной мельнице с использованием чаш и мелющих тел из корунда для исключения металлического намола. Ввиду его высокой пористости и низкой плотности, определение удельной поверхности методом газопроницаемости Козени и Кармана реализовать не удалось. В этой связи время помола подбирали, анализируя распределение частиц по размерам белого портландцемента и измельченного в течение разного времени (3, 5 и 15 минут) вспученного перлитового песка методом лазерной гранулометрии.

Согласно полученным данным (рисунок 3.5), белый цемент характеризуется высокой дисперсностью с максимальным размером частиц 19 мкм. Незначительное измельчение перлита (в течение трех минут) приводит к смещению пика размеров частиц в области 10–20 мкм и обеспечивает сопоставимую с вяжущим дисперсность. Продолжение измельчения до пяти минут привело к расширению основного пика, он стал более пологим, с формированием своеобразного плато в диапазоне 3–10 мкм, распределение частиц по размерам стало более равномерным – произошло разбиение исходных крупных частиц с формированием осколков разного размера от 0,1 до 32 мкм, с пиком по содержанию в области 7 мкм и небольшим содержанием частиц менее 0,1 мкм. Дальнейший помол перлита нецелесообразен, поскольку значительного прироста дисперсности не происходит, что, вероятно, связано с агломерацией частиц ввиду высокой активности. Таким образом, для дальнейшей работы выбрано время измельчения три минуты [163].

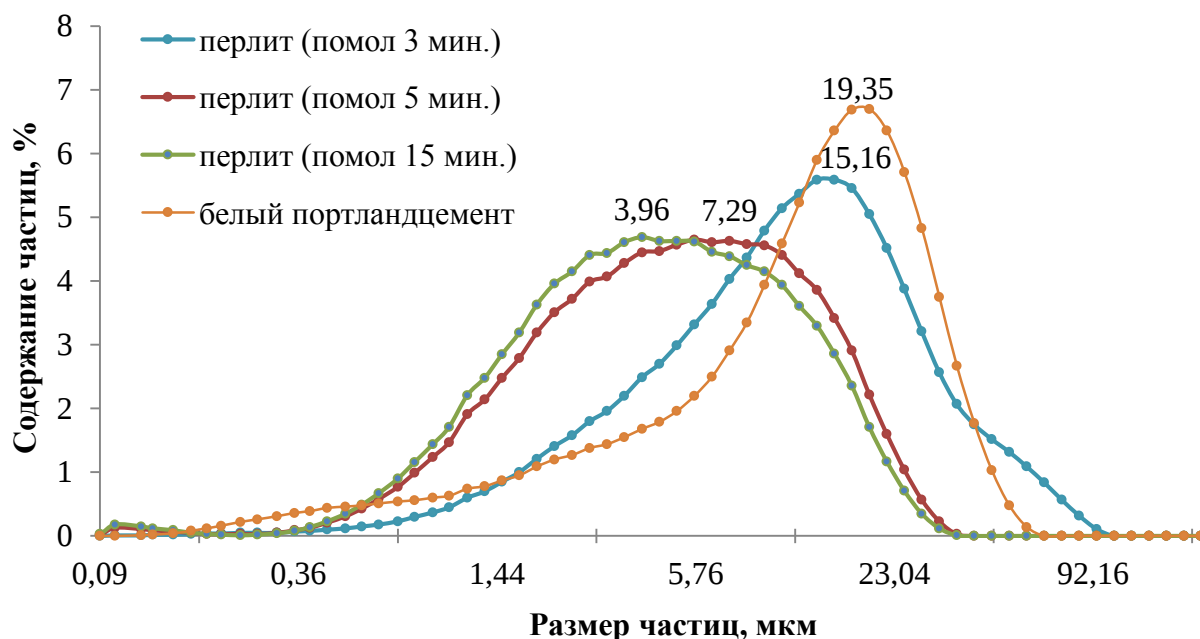


Рисунок 3.5 – Зависимость гранулометрического состава вспученного перлитового песка от времени помола

Микроструктура измельченного в течение трех минут песка (рисунок 3.6) характеризуется полидисперсностью (рисунок 3.6, а) и представлена преимущественно осколочными частицами угловатой неправильной формы (рисунок 3.6, б), сформированными при дроблении исходных округлых частиц с развитой поровой структурой.

При этом, после помола, можно заметить не только характерные для исходного материала частицы с размерами в несколько микрометров лещадной и раковистой формы с изломами, но и множество более мелких частиц до одного микрометра с формой близкой к изометричной (рисунок 3.6, в, г).

Таким образом, установлено время помола в планетарной мельнице вспученного перлитового песка, достаточное для достижения размера частиц близкого к цементным. Ввиду высокой пористости исходных частиц материал имеет высокую размолоспособность, т.е. помол не требует значительных энергетических и временных затрат. После трех минут помола удастся достичь полидисперсного гранулометрического состава перлита с размером частиц от десятых до нескольких десятков микрометров, что является предпосылкой высокой

пуццолановой активности полученной добавки в цементной системе и, возможно, выполнения роли наполняющего компонента.

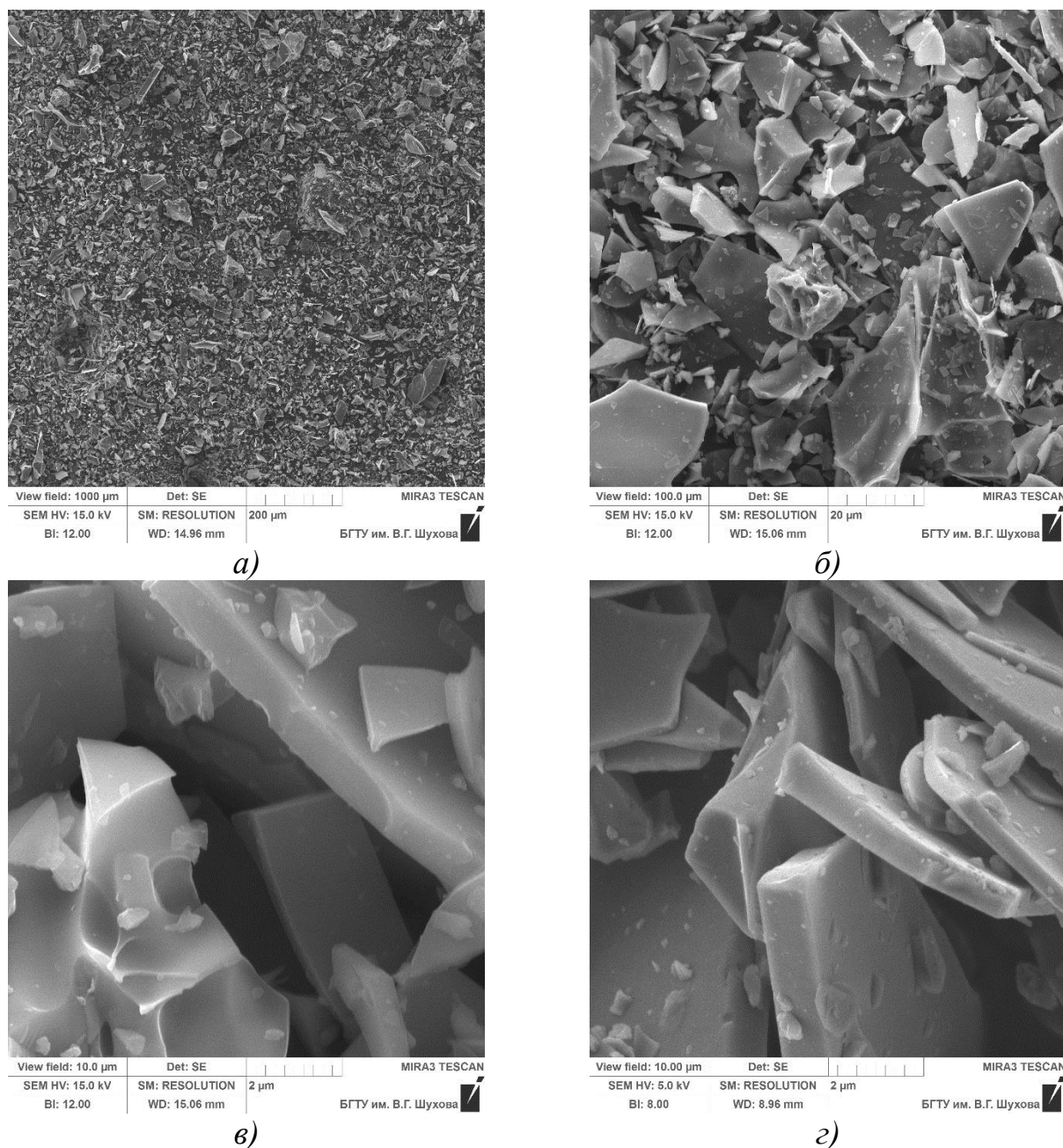


Рисунок 3.6 – Микроструктурные особенности вспученного перлитового песка после помола

На следующем этапе работы на предмет стойкости к биоагрессии исследован цементный камень с добавлением вспученного перлитового песка. Ранее было показано, что замена 10 % белого портландцемента на активированный вспученный перлитовый песок обеспечивает сохранение физико-механических характеристик цементного камня [163]. Однако, при замене части цемента на

пуццолановую добавку снижается щелочность жидкой фазы цементного камня, что повышает уязвимость последнего к биологической агрессии. В связи с чем, необходимым является контроль показателей биологического сопротивления модифицированного цементного камня [134].

Результаты экспозиции образцов в модельной среде (смеси органических кислот), имитирующей продукты метаболизма микроорганизмов.

Через месяц экспозиции цементного камня в модельной среде (рисунок 3.7) можно отметить значительное снижение прочности в сравнении с исходными значениями: на 20 % для контрольного цементного камня из белого портландцемента и на 35 % с добавкой вспученного перлитового песка. Такое негативное влияние добавки может быть обусловлено изначальным разуплотнением структуры цементного камня в присутствии алюмосиликатного компонента, наличием дефектных контактных зон «цементный камень – вспученный перлит», что повысило проницаемость для агрессивной среды. Также при замене части цемента на алюмосиликатную добавку, соответственно, снижается количество формируемых продуктов гидратации, отвечающих за плотность и прочность матрицы. Таким образом, после месяца выдерживания в модельной среде коэффициент биостойкости составил 0,80 для чистого цементного камня и 0,65 при добавлении вспученного перлитового песка.

После продолжения экспозиции образцов в модельной среде дальнейшего падения прочности не происходит. Для чистого цементного камня на протяжении последующих пяти месяцев выдерживания в модельной среде значения средней прочности на сжатие сохраняются около 45 МПа, но иногда со значительными отклонениями от образца к образцу. Такое поведение можно частично объяснить, изучив микроструктуру цементного камня (рисунок 3.8).

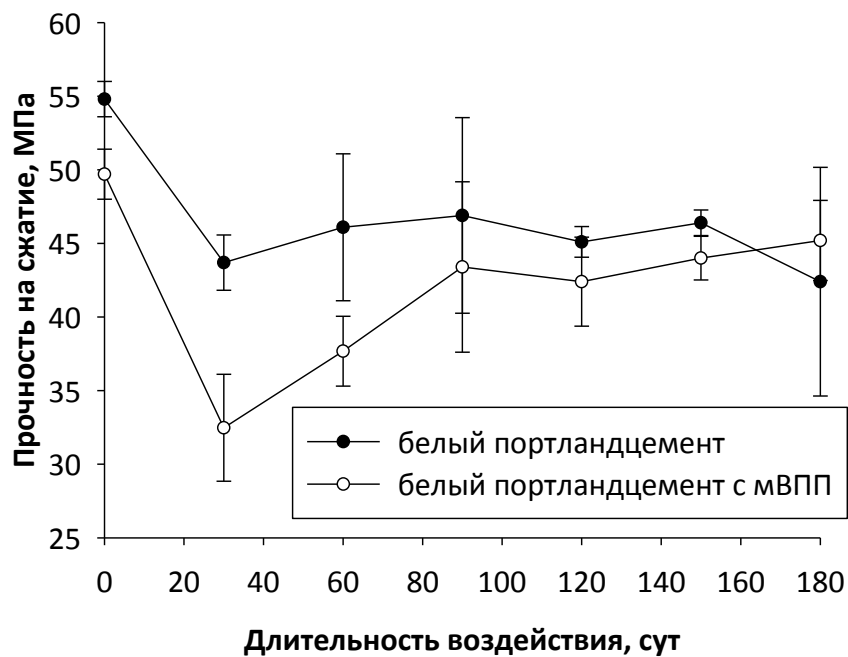


Рисунок 3.7 – Изменение прочности на сжатие цементного камня в зависимости от времени экспозиции в модельной среде

Сравнив микроструктуру исходного цементного камня (рисунок 3.8, а) с экспонированным один месяц в растворе кислот (рисунок 3.8, б) можно отметить наличие разуплотнений, вероятно связанных с вымыванием растворимых соединений цементного камня в результате кислотной агрессии. При этом на шестой месяц экспозиции подобных полостей становится меньше, однако наблюдаются сростки столбчатых, игольчатых, пластинчатых кристаллов (рисунок 3.8, в), сформированных, вероятно, в местах наблюдаемых ранее разуплотнений. Микроструктура выглядит местами более монолитной, но сохраняется большое количество дефектов, формируемые новообразования не заполняют все пространство полостей, что и приводит к варьированию значений прочности на сжатие.

Аналогичные процессы наблюдаются и в цементном камне со вспученным перлитовым песком. Изначально структура менее однородна в результате присутствия частиц перлита (рисунок 3.8, г). Через месяц экспозиции в растворе кислот в структуре обнаруживаются полости (рисунок 3.8, д). Через 6 месяцев

отмечается развитая сетка новообразований (рисунок 3.8, е). При этом в случае цементного камня со вспученным перлитовым песком в процессе экспозиции в модельной среде с первого по шестой месяц средняя прочность на сжатие увеличивается (см. рисунок 3.7) и практически достигает прочности контрольного цементного камня. Это можно объяснить тем, что рентгеноаморфная составляющая вспученного перлита, являясь пуццолановоактивным компонентом, обеспечивает связывание свободного гидроксида кальция с образованием гидросиликатов кальция второй генерации, что и приводит к росту прочности цементной матрицы.

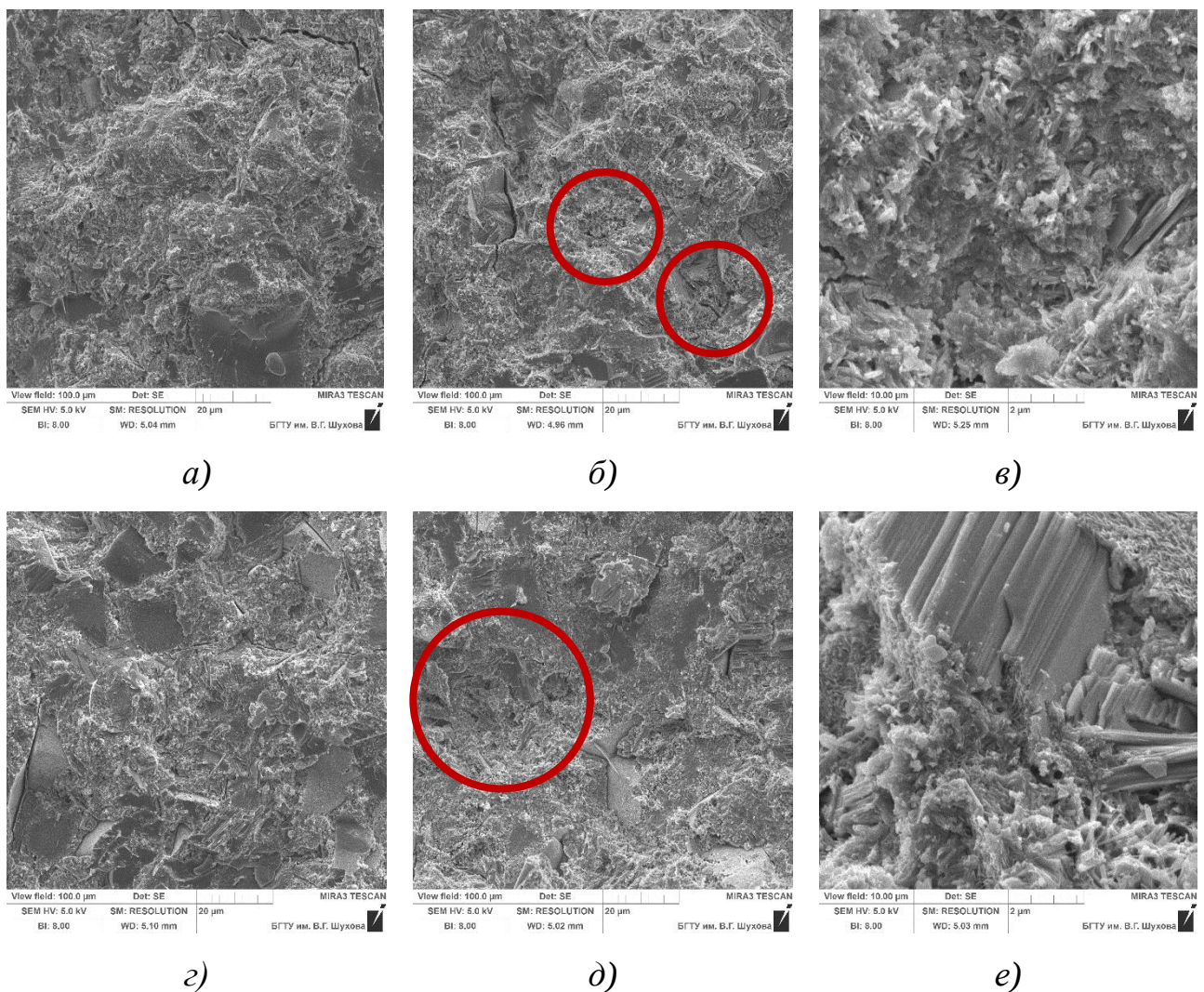


Рисунок 3.8 – Изменение микроструктуры цементного камня контрольного (а–в) и со вспученным перлитовым песком (г–е) в зависимости от времени экспозиции в модельной среде: а, г – исходные; б, д – 1 месяц; в, е – 6 месяцев

Результаты заражения образцов суспензией спор грибов.

При исследовании образцов цементного камня, не подвергнутых принудительной карбонизации, как чистых, так и со вспученным перлитовым песком, наблюдаемая картина схожа: к 28 суткам развития гриба на питательной среде отмечается значительная зона фунгицидности (рисунок 3.9, а, б). Из-за диффундирования в питательную среду межпоровой жидкости цементного камня с высоким рН отмечается сильный фунгицидный эффект. Поэтому в дальнейшем исследованы только образцы, подвергнутые после 28 суток твердения принудительной карбонизации в среде углекислого газа.

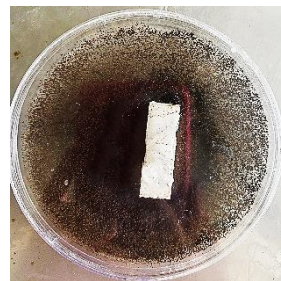


а)

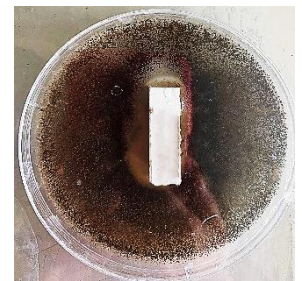


б)

Рисунок 3.9 – Развитие гриба *Aspergillus niger* на питательной среде в присутствии цементного камня контрольного (а) и со вспученным перлитовым песком (б)



а)



б)

Рисунок 3.10 – Развитие гриба *Aspergillus niger* на питательной среде в присутствии принудительно карбонизованного цементного камня контрольного (а) и со вспученным перлитовым песком (б)

Визуальная оценка предварительно карбонизованных и затем выдержанных 28 суток в чашках Петри образцов цементного камня (см. рисунок 3.10), показала развитие и распределение гриба по чашке Петри тонким равномерным слоем. У чистого цементного камня (рисунок 3.10, а) зоны ингибирования роста гриба не наблюдается, но и спор и развития мицелия на поверхности образцов также не наблюдается (рисунок 3.11, а). У цементного камня с добавкой вспученного перлитового песка наблюдается небольшая зона ингибирования роста гриба (рисунок 3.10, б). Такое отличие может быть связано с изменением характера

поровой структуры или состава поровой жидкости, что опять-таки привело к ее диффундированию в питательную среду, при замене части портландцемента вспученным перлитовым песком. Спор и развития мицелия на поверхности образцов не наблюдается (рисунок 3.11, б).

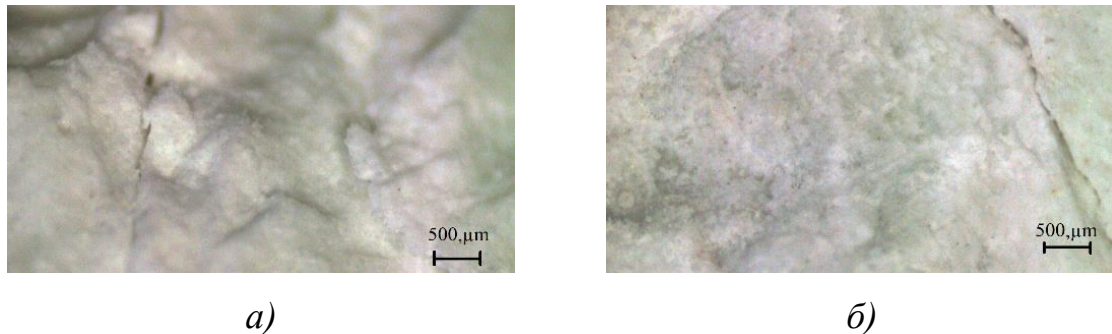


Рисунок 3.11 – Поверхность принудительно карбонизованного цементного камня контрольного (а) и со вспученным перлитовым песком (б) после эксперимента с *Aspergillus niger* (вид в биологический микроскоп)

В таблице 3.2 сведены результаты оценки грибостойкости предварительно карбонизованного цементного камня по интенсивности роста гриба *Aspergillus niger*.

Можно говорить о стойкости цементного камня из белого цемента, в том числе с перлитом, к воздействию мицелиального гриба *Aspergillus niger*.

Таким образом, полученные результаты показывают, что замена части белого портландцемента на пуццолановую добавку, в частности, вспученный перлитовый песок, не приводит к снижению показателей биологического сопротивления цементного камня [134].

Целью следующего этапа работы являлась разработка способа подготовки вспученного перлитового песка для его использования в качестве полифункционального компонента в составе вяжущего – пуццолановой добавки и носителя фотокатализатора – наноразмерного диоксида титана. Предполагается, что закрепление фотокаталитической добавки на поверхности минерального носителя – вспученного перлита обеспечит его эффективное распределение в

составе бетонной смеси, и закрепление в поверхностном слое готового изделия.

Таблица 3.2 – Оценка грибостойкости по интенсивности роста гриба *Aspergillus niger*

Цементный камень	Степень развития плесневых грибов в баллах по Методу 4 ГОСТ 9.048–89	Зона ингибирования роста грибов, мм	Оценка материала по Методу 3 ГОСТ 9.049–91
контрольный	0*	0	Фунгистатичный
со вспученным перлитовым песком	0*	5	Фунгицидный

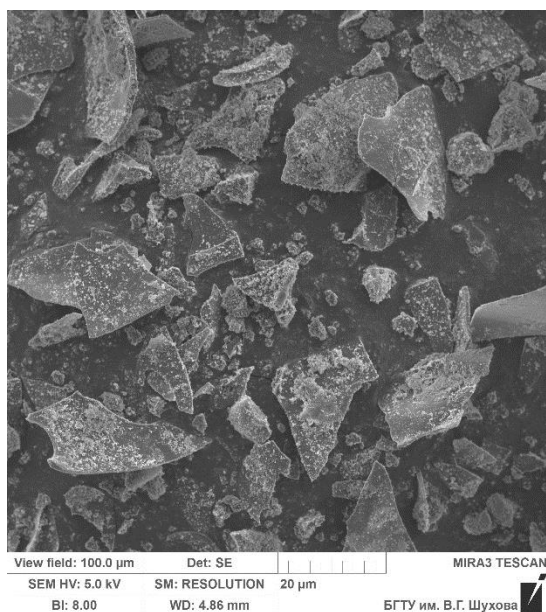
* – под микроскопом прорастания спор и конидий не обнаружено

Закрепление частиц фотокаталитической добавки – наноразмерного диоксида титана на поверхности частиц вспученного перлитового песка в рамках данной работы предлагается путем формирования связей Ti–O–Si, что может быть осуществлено в результате совместного помола исходных компонентов.

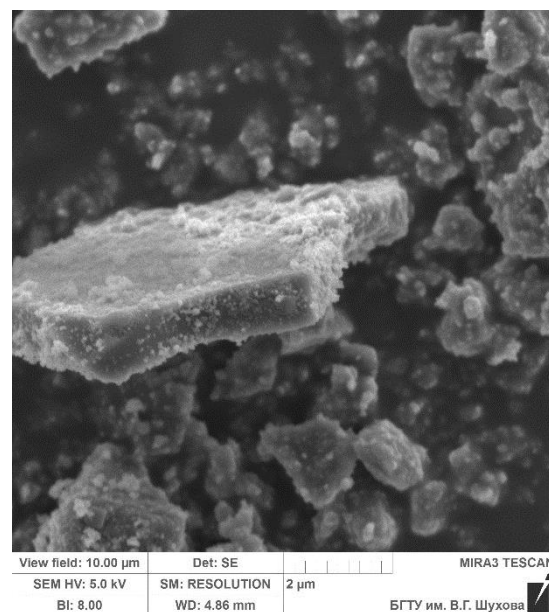
Для помола соотношение фотокаталитической добавки и вспученного перлитового песка по массе было принято 1:1. Смесь данных компонентов была подвергнута помолу в планетарной мельнице в течение трех минут. Ударно-истирающие воздействия в данной мельнице обеспечивает: измельчение частиц вспученного перлита, разбиение конгломератов анатаза, равномерное распределение обеих фаз.

Присутствие диоксида титана при помоле привело к более интенсивному размолу вспученного перлита (рисунок 3.12). Полученные частицы имеют меньшие размеры (рисунок 3.12, а) и более сглаженную форму (рисунок 3.12, б) в сравнении с частицами перлита, измельченного без диоксида титана (см. рисунок 3.6, б, в). Наноразмерные частицы диоксида титана и их агломераты равномерно распределены по поверхности измельченных частиц перлита (рисунок 3.12, в, г) и

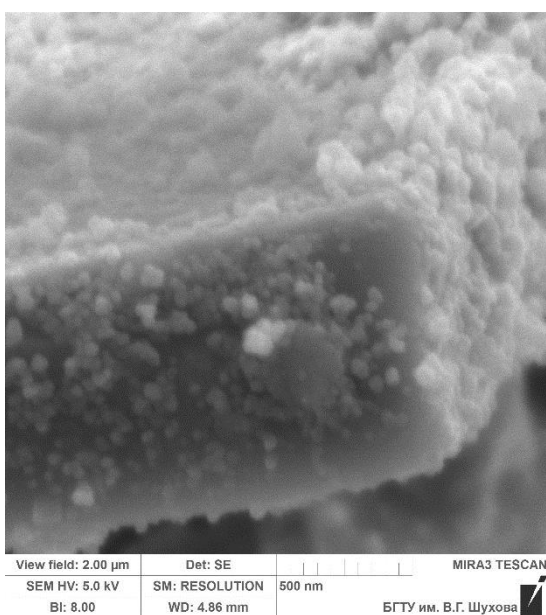
выглядят «втертыми» в их поверхность.



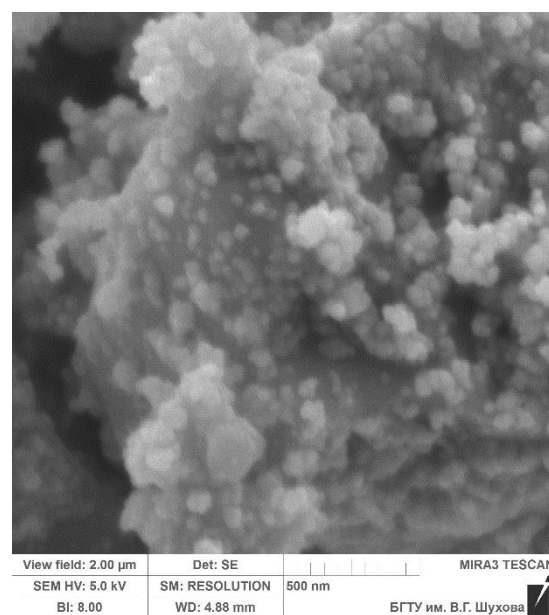
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.12 – Микроструктурные особенности продукта помола вспученного перлитового песка с диоксидом титана

Равномерное распределение диоксида титана по объему пробы подтверждается и результатами картирования по химическим элементам Si, Al и Ti (рисунок 3.13), за исключением крупных частиц перлита (зоны, отмеченные желтым цветом на рисунке 3.13), которые в дальнейшем могут обеспечить

пуццолановую реакцию в составе вяжущего.

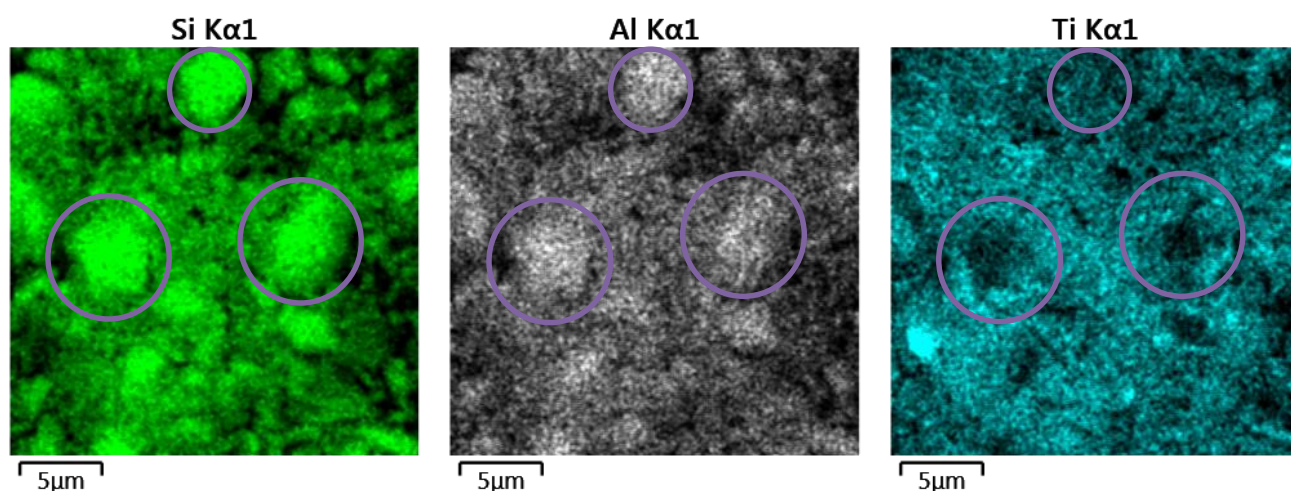


Рисунок 3.13 – Картирование по химическим элементам Si, Al и Ti продукта помола вспученного перлитового песка с диоксидом титана

Таким образом, совместный помол вспученного перлитового песка и диоксида титана обеспечил более эффективное их распределение, измельчение частиц и агломератов, в том числе втирание диоксида титана в поверхностный слой осколков вспученного перлита и «окатывание» формы последних, что может положительно повлиять на реологические параметры вяжущей системы.

При контроле методом ИК-спектроскопии возможного формирования связей Ti–O–Si в результате совместного помола вспученного перлитового песка и анатаза, их наличие установить не удалось (рисунок 3.14, спектр «Помол ВПП+Ан 1:1»). Согласно литературным данным вибрация данной связи должна отмечаться в диапазоне длин волн $900\text{--}970\text{ см}^{-1}$ [164–169]. В связи с этим было принято решение о необходимости предварительной кислотной активации поверхности перлита, что должно способствовать формированию химических связей при помоле.

Согласно литературным данным, для активации поверхности силикатных и алюмосиликатных материалов может быть использован широкий спектр кислот (HCl, H₂SO₄, H₃PO₄ и др.) при различных концентрациях (0,5–4 М и др.). Однако неорганические кислоты являются более коррозионно опасными для продуктов

гидратации цемента, чем органические, ввиду чего было принято решение об использовании органических кислот (например, муравьиной CH_2O_2 , щавелевой $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$, уксусной $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, лимонной $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ и др.). С целью снижения себестоимости конечного материала и предотвращения разрушения структуры перлита, к использованию был принят раствор щавелевой кислоты [170–173].

Для установления достаточной концентрации кислоты вспученный перлитовый песок выдерживали в растворах различной концентрации с последующим определением концентрации Льюисовских основных центров (атомов кислорода, необходимых для образования мостиковой связи между Si и Ti) (таблица 3.3). Как видно из полученных результатов, при использовании концентрации кислоты свыше 2 % значительного прироста концентрации основных центров по Льюису не происходит.

Таблица 3.3 – Концентрация основных центров по Льюису на поверхности вспученного перлитового песка в зависимости от концентрации раствора щавелевой кислоты

Концентрация раствора щавелевой кислоты, %	Концентрация основных центров по Льюису, ммоль/г
Без обработки	20,90
1	29,12
2	37,72
3	38,65
4	39,14

Таким образом, для подготовки вспученного перлитового песка как компонента полифункционального композиционного материала исходный вспученный перлитовый песок выдерживали 45 минут в 2 %-м растворе кислоты. После фильтрации полученную суспензию промывали 0,01 %-м раствором кислоты, затем отправляли в планетарную мельницу совместно с анатазом. После

помола полученный порошок промывали дистиллированной водой для удаления остатков кислоты и сушили при 70 °С.

Рассматривая ИК-спектры (рисунок 3.14) исходных материалов (анатаз и вспученный перлитовый песок) и продуктов их совместного помола можно наблюдать:

1) для спектра анатаза (Ан) – широкую полосу в диапазоне от 3600 до 2400 см^{-1} , соответствующую валентным колебаниям гидроксильных групп –ОН цепи Ti–ОН и адсорбированных молекул воды; полосу около 1630 см^{-1} , соответствующую деформационным колебаниям гидроксильных групп –ОН; полосы около 1380–1400 см^{-1} и 400–900 см^{-1} , соответствующие колебаниям связи Ti–O [111];

2) для спектра вспученного перлитового песка (ВПП) – широкую полосу в области растяжения –ОН на поверхности алюмосиликатов (около 3630 см^{-1}), переходящую в широкий диапазон около 3400 см^{-1} и пик около 1630 см^{-1} , которые характерны для связанных разными способами молекул воды. Также отмечается наличие колебаний связей Si–O и Al–O–Si кристаллических и аморфных силикатов: 975–1300 см^{-1} – колебания Si–O; 780–800 см^{-1} – кварца и стеклофазы; 580 см^{-1} – полевых шпатов и стеклофазы; 460 см^{-1} – силикатов [174];

3) для спектра продукта совместного помола анатаза и вспученного перлитового песка в соотношении 1:1 (Помол ВПП+Ан 1:1) – полосы и пики, характерные для исходных продуктов, но с пониженной интенсивностью ввиду снижения их содержания; частичное снижение интенсивности в области колебаний Ti–O, конкретнее, в диапазоне от 500 до 780 см^{-1} , что может быть связано с уменьшением активной поверхности частиц анатаза в результате «втирания» (см. рисунок 3.12);

4) для спектра продукта совместного помола анатаза и предварительно обработанного кислотой вспученного перлитового песка в соотношении 1:1 (Помол ВПП+Ан 1:1 с кислотной обработкой) – снижение интенсивности поглощения в области широкой полосы, характерной для колебаний гидроксильных групп (от 3300 до 3600 см^{-1}), что обусловлено сушкой продукта

совместного помола после промывания; полосы и пики, характерные для исходных продуктов, но с еще более пониженной интенсивностью ввиду не только снижения их содержания, но и формирования связей Ti-O-Si , колебания которых можно отметить в диапазоне около 902 см^{-1} .

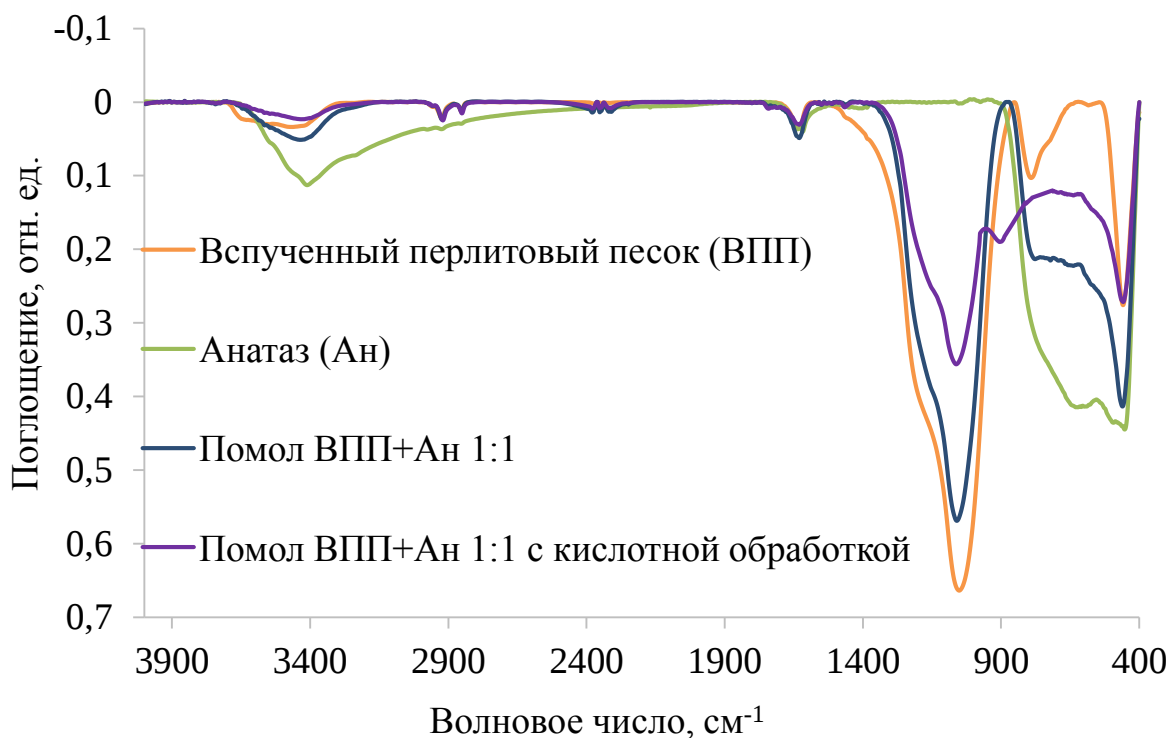


Рисунок 3.14 – ИК-спектры исходных материалов
и продуктов их совместного помола

Таким образом, ввиду достигнутого формирования связей Ti-O-Si , для дальнейших исследований и разработки вяжущего был использован продукт совместного помола анатаза и предварительно обработанного кислотой вспученного перлитового песка в соотношении 1:1.

Для оценки характеристик полученного материала «вспученный перлитовый песок, предварительно обработанный кислотой – анатаз» (далее «ВПП–Ан») как компонента цементного вяжущего, определяли его пуццоланические свойства. В качестве контрольных образцов использовали исходный и молотый вспученный перлитовый песок (мВПП).

Пуццоланическую активность определяли по количеству поглощенного CaO

из насыщенного раствора гидроокиси кальция при нагревании по ГОСТ Р 56593–2015 (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Пуццоланическая активность вспученного перлитового песка (исходного и обработанного)

Вспученный перлитовый песок	V ₀ , мл	V ₁ , мл	V ₂ , мл	Количество поглощенного СаО, мг/г
Исходный	151,3	6,7	36,9	346,7
мВПП (без кислотной обработки)*		1,8		403,0
ВПП–Ан		5,4		361,6

* в связи с тем, что кислотная обработка применялась только с целью закрепления анатаза на частицах вспученного перлитового песка, отдельно как способ его модификации она не рассматривалась. В представленных далее по тексту исследованиях «мВПП» был изучен без кислотной обработки, а «ВПП–Ан», соответственно, с предварительной кислотной обработкой.

Согласно полученным результатам, помол в течение трех минут позволил увеличить пуццоланическую активность вспученного перлитового песка на 16 %, что обусловлено, с одной стороны, высвобождением дополнительной пористости за счет разлома частиц, а с другой – некоторой активацией поверхности твердой фазы в результате физико-механического воздействия [163]. Пуццоланическая активность ВПП–Ан ниже, ввиду пониженного содержания кремнезема в одном грамме пробы. Однако, достигнутая более высокая дисперсность частиц перлита, измельченного совместно с анатазом, позволила нивелировать снижение пуццоланической активности относительно перлита, измельченного самостоятельно: снижение составило 10 % при уменьшении содержания перлита на 50 % по массе. В данном случае, вклад в повышение пуццоланической активности могла внести и предварительная обработка перлита кислотой.

Полученные результаты согласуются с данными по концентрации активных

адсорбционных центров, которые являются показателем активности поверхности: измельчение вспученного перлитового песка за счет ударно-истирающих воздействий обеспечивает прирост активности по исследованному диапазону индикаторов более чем в шесть раз в результате раскола зерен и формирования новых поверхностей (рисунок 3.15, таблица 3.5).

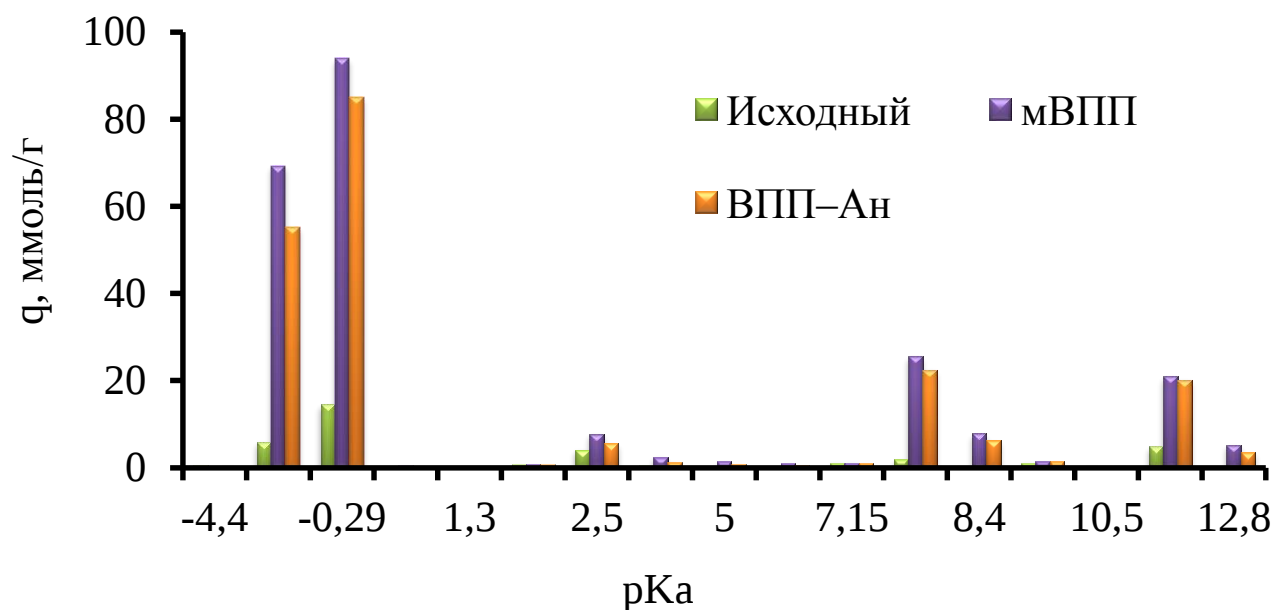


Рисунок 3.15 – Распределение кислотно-основных центров на поверхности вспученного перлитового песка (исходного и обработанного)

Таблица 3.5 – Концентрация кислотно-основных центров на поверхности вспученного перлитового песка (исходного и измельченного)

Вспученный перлитовый песок	Концентрация активных центров, ммоль/г			
	Основания по Льюису	Кислоты по Бренстеду	Основания по Бренстеду	Сумма
Исходный	20,90	5,53	9,72	36,15
мВПП (без кислотной обработки)	163,32	14,30	62,50	240,12
ВПП-Ан	140,75	9,45	54,96	205,16

Измельченный с анатазом перлит характеризуется высоким суммарным содержанием исследованных активных центров, в сравнении с исходным, и по активности сопоставим с мВПП, что обусловлено повышением его дисперсности при помоле с анатазом и вкладом кислотно-основных характеристик поверхности последнего, который, в том числе, является наноразмерным. В свою очередь, некоторое снижение относительно перлита, измельченного самостоятельно, может быть обусловлено сушкой после кислотной обработки, соответственно, снижением количества адсорбированной воды.

Активность полученной добавки проверяли также по прочности на сжатие с использованием критерия Фишера (t-критерий) (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Активность вспученного перлитового песка (исходного и обработанного), определенная по прочности на сжатие

Смесь	Соотношение портландцемент / минеральная добавка	Rсж, МПа	t- критерий
Белый портландцемент (БПЦ) / песок	1/2	39,1	–
БПЦ / ВПП		44,0	5,7
БПЦ / мВПП		53,5	18,5
БПЦ / ВПП–Ан		44,3	6,0

По полученным результатам можно наблюдать, что исходный вспученный перлитовый песок не дает значительного прироста прочности цементному камню (12 %) и значение критерия Фишера для него значительно меньше 15, и составляет 5,7. Измельчение перлита, обеспечившее его активацию, позволило достичь повышения прочности на 37 %, и значение критерия Фишера составило 18,5, что свидетельствует о возможности его применения в качестве активной минеральной добавки. Использование добавки, представляющей собой смесь измельченного

перлита, предварительно обработанного кислотой, с диоксидом титана, позволило незначительно (на 13,3 %) увеличить прочность цементного камня за счет пуццоланической активности перлита и возможного ускорения зародышеобразования на наноразмерной фазе анатаза.

Таким образом, доизмельчение перлита нивелирует возможное отрицательное влияние наноразмерного анатаза на процессы фазо- и структурообразования белого портландцемента, что будет исследовано в дальнейшем и при других соотношениях компонентов вяжущего и бетонной смеси, близких к применяемым в производстве тонкостенных изделий.

Для проверки целесообразности введения анатаза при помоле вспученного перлитового песка была определена фотокаталитическая активность полученных систем. Порошкообразные продукты помола были смешаны с белым портландцементом в соотношениях, указанных в таблице 3.7. Массовое содержание TiO_2 во всех образцах было одинаковым.

Таблица 3.7 – Фотокаталитическая активность образцов вяжущего в зависимости от состава

№ п/п	Характеристика системы «ВПП–Ан»	Соотношение БПЦ/(ВПП+ Ан)	В/Ц	Фотокаталитическая активность (удаление Родамина Б), %		
				4 часа	26 часов	Δ от контрольного образца
1	Совместный помол	1/0,67	0,71	60,6	77,4	19,8
2	Совместный помол + предварительная кислотная обработка перлита			57,7	89,7	32,0

Окончание таблицы 3.7 – Фотокаталитическая активность образцов вяжущего в зависимости от состава

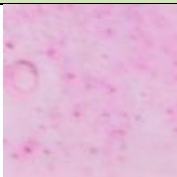
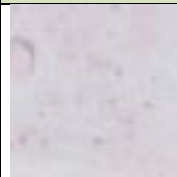
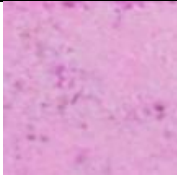
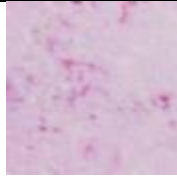
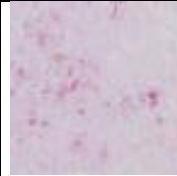
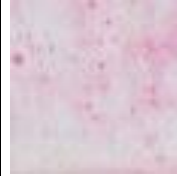
№ п/п	Характеристика системы «ВПП–Ан»	Соотношение БПЦ/(ВПП+ Ан)	В/Ц	Фотокаталитическая активность (удаление Родамина Б), %		
				4 часа	26 часов	Δ от контрольного образца
3	Смесь (без совместного помола)	1/0,67	0,71	52,2	69,2	11,6
4	Контроль без TiO ₂			38,6	57,6	–

По полученным результатам определения фотокаталитической активности (см. таблицы 3.7 и 3.8) можно отметить, что совместный помол перлита с фотокатализатором (удаление родамина Б – 77,4 %, разница с контрольным образцом (без TiO₂) – 19,8) более эффективен, чем их смешение (удаление родамина Б – 69,2 %, разница с контрольным образцом (без TiO₂) – 11,6). Совместный помол обеспечил более равномерное распределение фотокатализатора и разбиение его агрегатов. Наиболее фотокаталитически активной оказалась добавка, полученная совместным помолом анатаза и предварительно обработанного кислотой вспученного перлитового песка (удаление родамина Б – 89,7 %, разница с контрольным образцом (без TiO₂) – 32). Повышение фотокаталитической активности в данном случае связано не только с равномерным распределением фотокатализатора, но и с формированием связей Ti–O–Si.

Таким образом, на данном этапе показана эффективность предварительной кислотной обработки вспученного перлитового песка для последующего его совместного помола с фотокатализатором TiO₂. Полученный продукт характеризуется не только повышенной фотокаталитической активностью, но и пуццоланическими свойствами, достаточными для его использования в качестве

минеральной добавки к белому портландцементу для разработки мелкозернистого бетона для декоративных и атмосферостойких самоочищающихся изделий.

Таблица 3.8 – Обесцвечивание (удаление) Родамина Б на поверхности образцов вяжущего в зависимости от состава

№ п/п	Характеристика системы «ВПП–Ан »	Время УФ-облучения, ч		
		0	4	26
1	Совместный помол			
2	Совместный помол + предварительная кислотная обработка перлита			
3	Смесь (без совместного помола)			
4	Контроль без TiO ₂			

3.3 Свойства цементной системы с комплексом минеральных добавок

При принятии решения о количестве активной минеральной добавки и наполнителя вводимых взамен белого портландцемента учитывался тот факт, что согласно ГОСТ 965–89 в белом портландцементе допускается суммарное содержание до 20 % активных минеральных добавок и добавок наполнителей. Такой продукт существует на рынке, например, Cemix ProWhite ПЦБ 1-500-Д20 от компании Cemix. Таким образом, представляет интерес рассмотреть вяжущую систему с превышающим количеством активной минеральной добавки и добавки

наполнителя, при этом сохраняющее физико-механические характеристики и проявляющее фотокаталитическую активность. В тоже время, из литературных источников известно, что значительное содержание вспученного перлита в смеси с портландцементом приводит к падению прочности затвердевшего камня [175], что обусловлено значительным повышением водопотребности смеси при его использовании и низкой плотностью формируемой структуры.

Так после помола вспученного перлитового песка и смешении его с портландцементом в различных соотношениях отмечен значительный рост водопотребности вяжущего (рисунок 3.16).

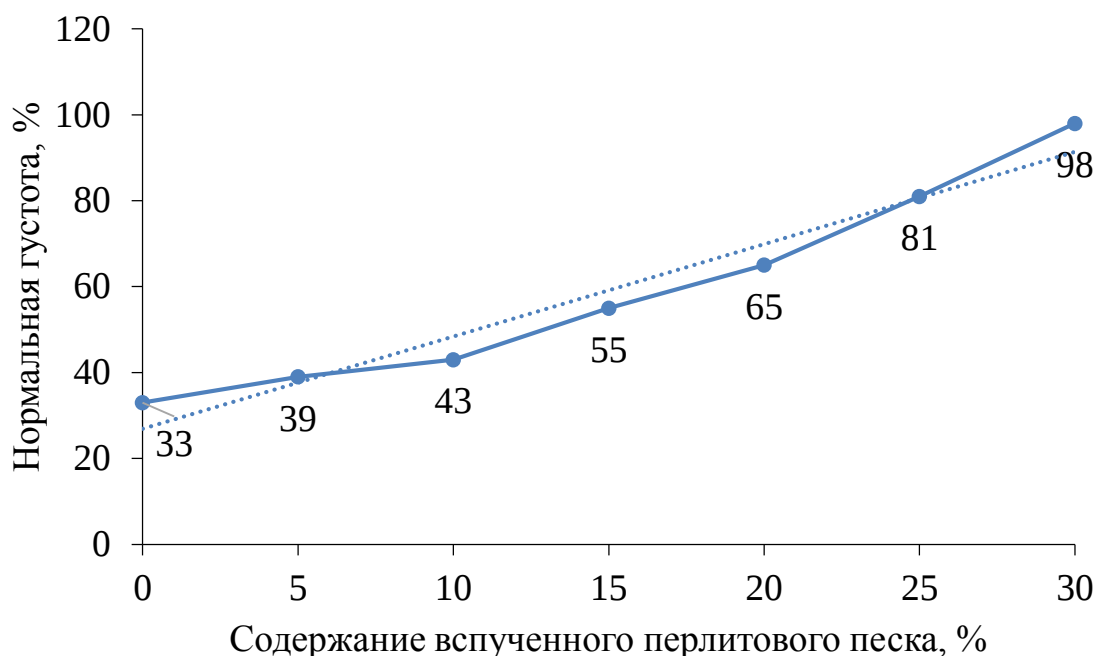


Рисунок 3.16 – Зависимость нормальной густоты вяжущего от содержания измельченного вспученного перлитового песка

Кроме того, с точки зрения реализации пуццолановой реакции повышенное содержание перлита также не будет целесообразным, т.к. в цементном камне при полной гидратации образуется не более 20–30 % портландита в зависимости от минерального состава клинкера [176].

Для установления оптимального содержания компонентов (вспученного перлитового песка (в составе добавки ВПП–Ан) и микрокальцита)),

обеспечивающего нивелирование снижения прочности за счет пуццолановой реакции и контроля реологических характеристик смеси, использован трехфакторный эксперимент.

Для получения уравнений регрессии использован центральный композиционный план, где два непрерывных фактора: «Содержание ВПП–Ан» и «Содержание микрокальцита» и один дискретный – «Гранулометрический состав микрокальцита» (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Варьируемые параметры

Факторы		Уровни варьирования				
Натуральный вид	Кодированный вид	–1,41421	–1	0	+1	+1,41421
Содержание ВПП–Ан, %	X_1	10,8579	15	25	35	39,1421
Содержание микрокальцита, %	X_2	10,8579	15	25	35	39,1421
Гранулометрический состав микрокальцита	X_3	1 – монодисперсный 2 – полидисперсный				

Указанное в таблице содержание добавок ВПП–Ан и микрокальцита отражает их содержание по массе в составе вяжущего, соответственно, при варьировании их содержания будет варьироваться и содержание белого портландцемента, что отражено в таблице 3.10. При проведении экспериментов использовано постоянное водотвердое отношение и содержание платифицирующей добавки. В качестве исследуемого отклика выступило значение прочности на сжатие образцов после тепловлажностной обработки при 85 °С по режиму 3+6+2 ч.

Таблица 3.10 – План и результаты эксперимента

№ опыта	X ₁	X ₂	X ₃	Содержание ВПП–Ан, %	Содержание микрокальцита, %	Гранулометрический состав микрокальцита	Содержание белого портландцемента, %	Прочность на сжатие, МПа
1.	–1	–1	1	15	15	монодисперсный	70	64,12
2.	+1	–1	1	35	15		50	45,65
3.	–1	+1	1	15	35		50	46,15
4.	+1	+1	1	35	35		30	34,13
5.	0	0	1	25	25		50	48,13
6.	0	0	1	25	25		50	47,99
7.	0	0	1	25	25		50	49,15
8.	–1	–1	2	15	15	полидисперсный	70	69,35
9.	+1	–1	2	35	15		50	50,12
10.	–1	+1	2	15	35		50	52,11
11.	+1	+1	2	35	35		30	36,12
12.	0	0	2	25	25		50	54,01
13.	0	0	2	25	25		50	53,85
14.	0	0	2	25	25		50	54,99

Окончание таблицы 3.10 – План и результаты эксперимента

№ опыта	X ₁	X ₂	X ₃	Содержание ВПП–Ан	Содержание микрокальцита	Гранулометрический состав микрокальцита	Содержание белого портландцемента	Прочность на сжатие, МПа
15.	–1,41421	0	1	10,8579	25	монодисперсный	64,1421	57,13
16.	+1,41421	0	1	39,1421	25		35,8579	38,13
17.	0	–1,4142	1	25	10,85786		64,14214	55,14
18.	0	+1,41421	1	25	39,14214		35,85786	41,11
19.	0	0	1	25	25		50	48,22
20.	0	0	1	25	25		50	47,15
21.	0	0	1	25	25		50	49,02
22.	–1,41421	0	2	10,8579	25	полидисперсный	64,1421	62,31
23.	+1,41421	0	2	39,1421	25		35,8579	40,01
24.	0	–1,4142	2	25	10,85786		64,14214	60,12
25.	0	+1,41421	2	25	39,14214		35,85786	42,13
26.	0	0	2	25	25		50	55,1
27.	0	0	2	25	25		50	54,01
28.	0	0	2	25	25		50	53,88

В результате выполнения эксперимента по представленному плану получены следующие уравнения регрессии:

– для монодисперсного микрокальцита:

$$R_{сж} = 79,33 - 0,572 \cdot X_1 - 0,529 \cdot X_2 - 0,00896 \cdot X_1^2 - 0,00781 \cdot X_2^2 + 0,01211 \cdot X_1 \cdot X_2;$$

– для полидисперсного микрокальцита:

$$R_{сж} = 89,34 - 0,689 \cdot X_1 - 0,621 \cdot X_2 - 0,00896 \cdot X_1^2 - 0,00781 \cdot X_2^2 + 0,01211 \cdot X_1 \cdot X_2.$$

Среднеквадратическое отклонение $S=1,38$.

Коэффициент детерминации $R^2=98,19\%$.

По полученным уравнениям регрессии построены зависимости прочности на сжатие вяжущего от содержания и гранулометрического состава компонентов (рисунки 3.17, 3.18).

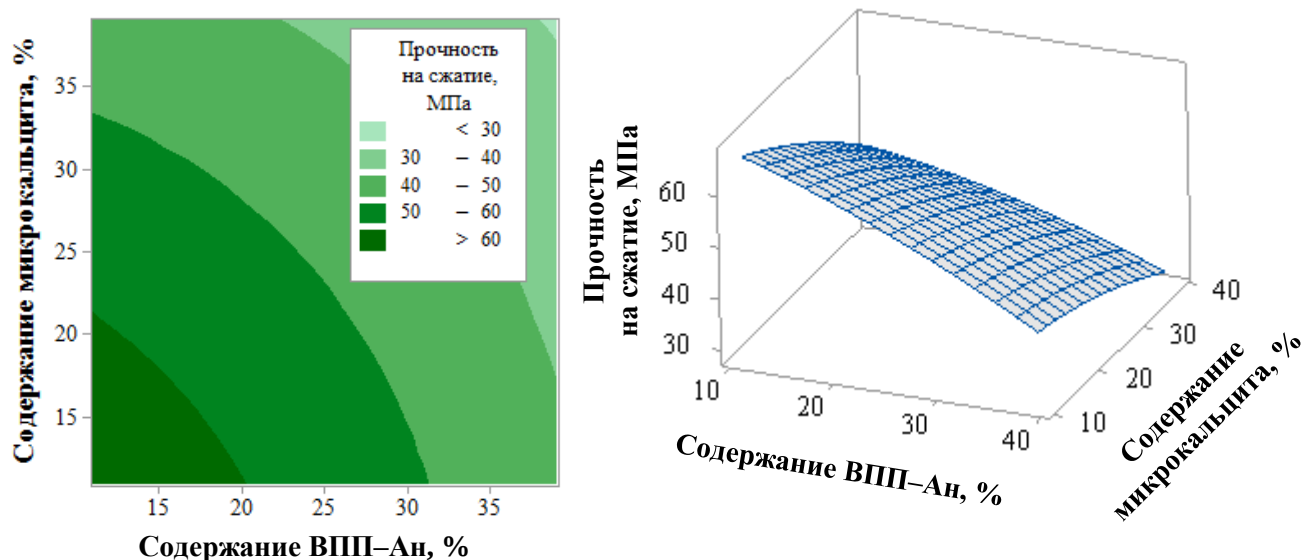


Рисунок 3.17 – Зависимость прочности на сжатие вяжущего от состава при использовании монодисперсного микрокальцита

Независимо от гранулометрических особенностей микрокальцита можно отметить тенденцию к снижению прочности цементного камня при увеличении содержания добавок. Так, согласно полученным моделям, при максимальном содержании добавок (по 40 %) и, следовательно, минимальном содержании портландцемента (20 %), прочность вяжущего составляет около 30 МПа, а при минимальном содержании добавок (по 10 %) и максимальном содержании

портландцемента (80 %) прочность вяжущего достигает 74 МПа при использовании полидисперсного микрокальцита, и 66 МПа – монодисперсного.

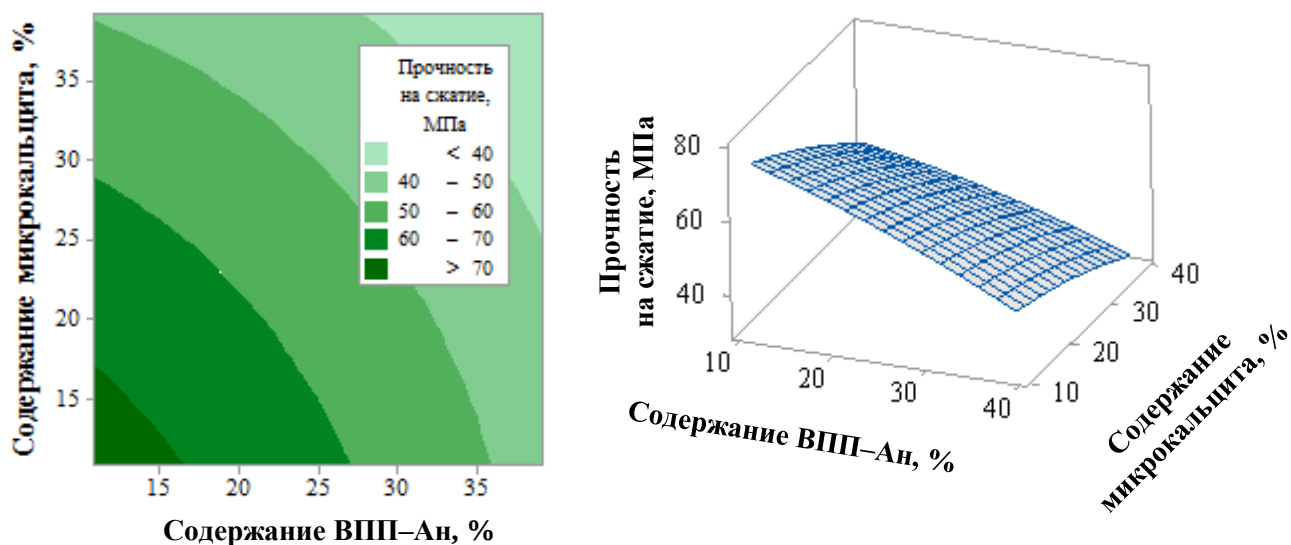


Рисунок 3.18 – Зависимость прочности на сжатие вяжущего от состава при использовании полидисперсного микрокальцита

Таким образом можно отметить, что использование полидисперсного микрокальцита позволяет получить вяжущее с большей прочностью, что может быть обусловлено как достижением более плотной упаковки частиц вяжущего, за счет оптимизации микроструктуры, так и вовлечением мелкой фракции микрокальцита в химические реакции гидратации с образованием более прочных продуктов [177].

С использованием полученных уравнений регрессии могут быть выбраны диапазоны содержания компонентов вяжущего для достижения требуемой прочности на сжатие после тепловлажностной обработки. Стоит отметить, что в исследованных системах не использовался заполнитель, и водотвердое отношение было постоянным, в связи с чем, значения прочности не являются окончательными и могут варьироваться при подборе состава бетона.

Для дальнейшего изучения особенностей фазо- и структурообразования вяжущего, выбрана система состава: 60 % белого портландцемента, 20 % добавки ВПП–Ан и 20 % полидисперсного микрокальцита, которая при водотвердом отношении 0,6 обеспечила прочность на сжатие после тепловлажностной

обработки 60 МПа.

Полученные оптимальные дозировки добавок использовались для оценки их влияния на нормальную густоту и сроки схватывания цементного теста (таблица 3.11). Так замена 20 % белого портландцемента на ВПП–Ан повышает водопотребность вяжущего на 21 %, а замена на микрокальцит – снижает на 9 %. Замена 40 % цемента на сумму вышеуказанных добавок сопровождается ростом водопотребности системы на 15 % по сравнению с чистым портландцементом. Увеличение нормальной густоты в составах с добавками связано с физической сорбцией воды высокодисперсными и пористыми частицами и их агрегатами.

Таблица 3.11 – Нормальная густота вяжущего в зависимости от состава

№ п/п	Содержание компонента, %				Нормальная густота, %	Сроки схватывания, мин	
	Состав смеси	Белый портланд- цемент (БПЦ)	ВПП– TiO ₂	Микрокальцит (МК)		начало	конец
1.	БПЦ	100	–	–	33	80	120
2.	БПЦ + мВПП	80	20	–	40	80	130
3.	БПЦ + Ан	80	–	20	35	70	130
4.	БПЦ + МК	60	20	20	38	60	140

Использование добавки ВПП–Ан не изменяет время начало схватывания: как и для цемента без добавок оно составило 80 минут. При этом конец схватывания наступил на 10 минут позже в сравнении с системой без добавок, 130 минут с добавкой БПЦ + ВПП–Ан против 120 минут для цемента без добавок. Несмотря на увеличение содержания воды в системе, сроки схватывания меняются незначительно, что может быть связано с ускорением зародышеобразования в присутствии минеральных тонкодисперсных компонентов. Так использование

микрокальцита ускоряет начало схватывания на 10 минут от контрольного образца и задерживает наступление конца схватывания также на 10 минут. Использование микрокальцита совместно с ВПП–Ан ускоряет начало схватывания на 20 минут от контрольного образца (БПЦ) и задерживает наступление конца схватывания также на 20 минут. Такое расширение периода схватывания может быть связано с более плавным и полным протеканием процессов гидратации.

В связи с этим, следующим этапом разработки вяжущего являлся рациональный выбор пластифицирующей добавки. Традиционно пластифицирующая добавка вводится на этапе приготовления бетонной смеси и зачастую независимо от вида цемента. Однако, в связи с многокомпонентным составом предлагаемого вяжущего и высокой дисперсностью его компонентов, традиционные составы бетонной смеси могут не обеспечить требуемой ее подвижности и привести к перерасходу пластификатора или воды затворения.

В связи с высокой водопотребностью вяжущего с минеральными добавками были исследованы смеси с различным водотвердым отношением. В качестве контрольной системы рассматривали белый портландцемент.

Выбор пластифицирующей добавки осуществляли с учетом требования к сохранению белого цвета смеси, и присутствию в ней компонентов с высокой дисперсностью. В связи с известной эффективностью для применения в подобных системах был выбран пластификатор на поликарбоксилатной основе – Melflux 1641 F. Диапазон дозировок добавки выбирали исходя из рекомендаций производителя. Введение добавки осуществлялось с равным шагом и происходило до прекращения увеличения значения расплыва мини-конуса (рисунок 3.19).

Полученные результаты показывают в целом повышение водопотребности вяжущего при замене 40 % портландцемента на тонкодисперсные добавки, что связано с избыточным поглощением воды из смеси. Увеличение расхода воды с $V/T=0,35$ до $V/T=0,45$ позволяет достичь большего расплыва мини-конуса для обоих видов вяжущего: для белого портландцемента максимальный расплыв составил 185 мм, для исследуемого состава – 170 мм. Установлена оптимальная дозировка поликарбоксилатного пластификатора, позволяющая достичь диаметра

расплава мини-конуса близкого к тесту белого портландцемента без минеральных добавок: при водотвердом отношении 0,45 она составила 0,4 %.

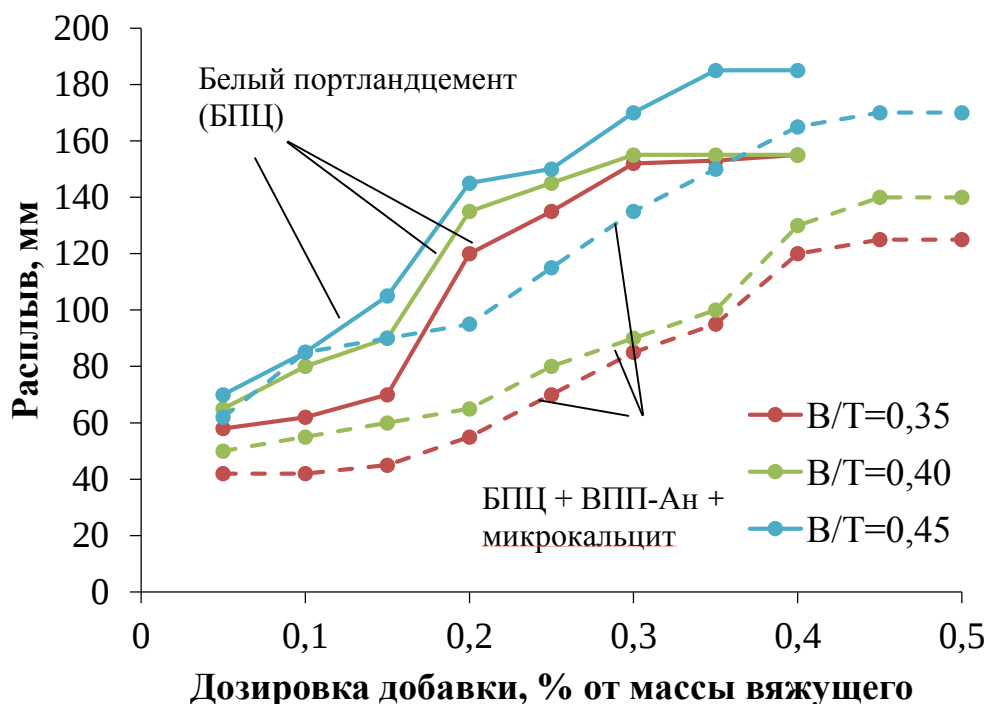


Рисунок 3.19 – Зависимость расплава мини-конуса вяжущих от водотвердого отношения и дозировки пластификатора

Для установления влияния каждого из компонентов вяжущего на его реологические характеристики были исследованы смеси нескольких составов (таблица 3.12). Добавки вводились в установленных оптимальных дозировках.

Рассматривая системы, где совместно с портландцементом используется только один из видов добавок (см. таблицу 3.12, №№ 2–4), можно отметить, что наноразмерный анатаз приводит к значительному повышению вязкости и напряжения сдвига системы в сравнении с ненаполненным портландцементом (рисунки 3.20 и 3.21), что обусловлено высокой удельной поверхностью частиц анатаза, наличием большого количества их агрегатов и агломератов, затруднением смачивания частиц водой, что в совокупности значительно препятствует течению смеси.

Повышение вязкости также наблюдается при использовании измельченного вспученного перлитового песка. Его частицы имеют неправильную форму и

развитую морфологию поверхности, что приводит к неравномерному распределению воды в системе и затрудняет течение смеси.

Таблица 3.12 – Составы вяжущих смесей

№ п/п	Содержание компонентов, %						Содержание от количества компонентов вяжущей смеси, %	
	Состав смеси	Белый портландцемент (БПЦ)	Вспученный перлитовый песок молотый (мВПП)	Анатаз (Ан)	Микрокальцит (МК)	ВПП–Ан	Суперпластификатор Melflux 1641 F	Вода
1.	БПЦ	100	–	–	–	–	0,4	45
2.	БПЦ + мВПП	90	10	–	–	–		
3.	БПЦ + Ан	90	–	10	–	–		
4.	БПЦ + МК	80	–	–	20	–		
5.	БПЦ + мВПП + Ан + МК	60	10	10	20	–		
6.	БПЦ + ВПП–Ан	80	–	–	–	20		
7.	БПЦ + ВПП–Ан + МК	60	–	–	20	20		

Использование же микрокальцита позволяет снизить вязкость суспензии, что обусловлено известным повышением разжижающей способности поликарбоксилатных суперпластификаторов в присутствии положительно заряженных карбонатных частиц [178–180].

Исследование суспензии, содержащей смесь всех вышеуказанных компонентов (БПЦ + мВПП + Ан + МК) показало по-прежнему очень высокие значения вязкости и напряжения сдвига, обусловленные присутствием наноразмерного анатаза, но незначительно нивелированные присутствием микрокальцита.

Снизить негативное влияние наноразмерного анатаза на реотехнологические характеристики цементного теста позволило использование продукта совместного

помола вспученного перлитового песка и анатаза (БПЦ + ВПП–Ан). Их совместный помол позволил разбить агрегаты и агломераты исходных продуктов, равномерно распределить отдельные частицы и частично снизить активность поверхности частиц, осадив их на частицах перлита, а также сгладить форму частиц перлита, что позволило облегчить течение суспензии, снизить ее вязкость и напряжение сдвига.

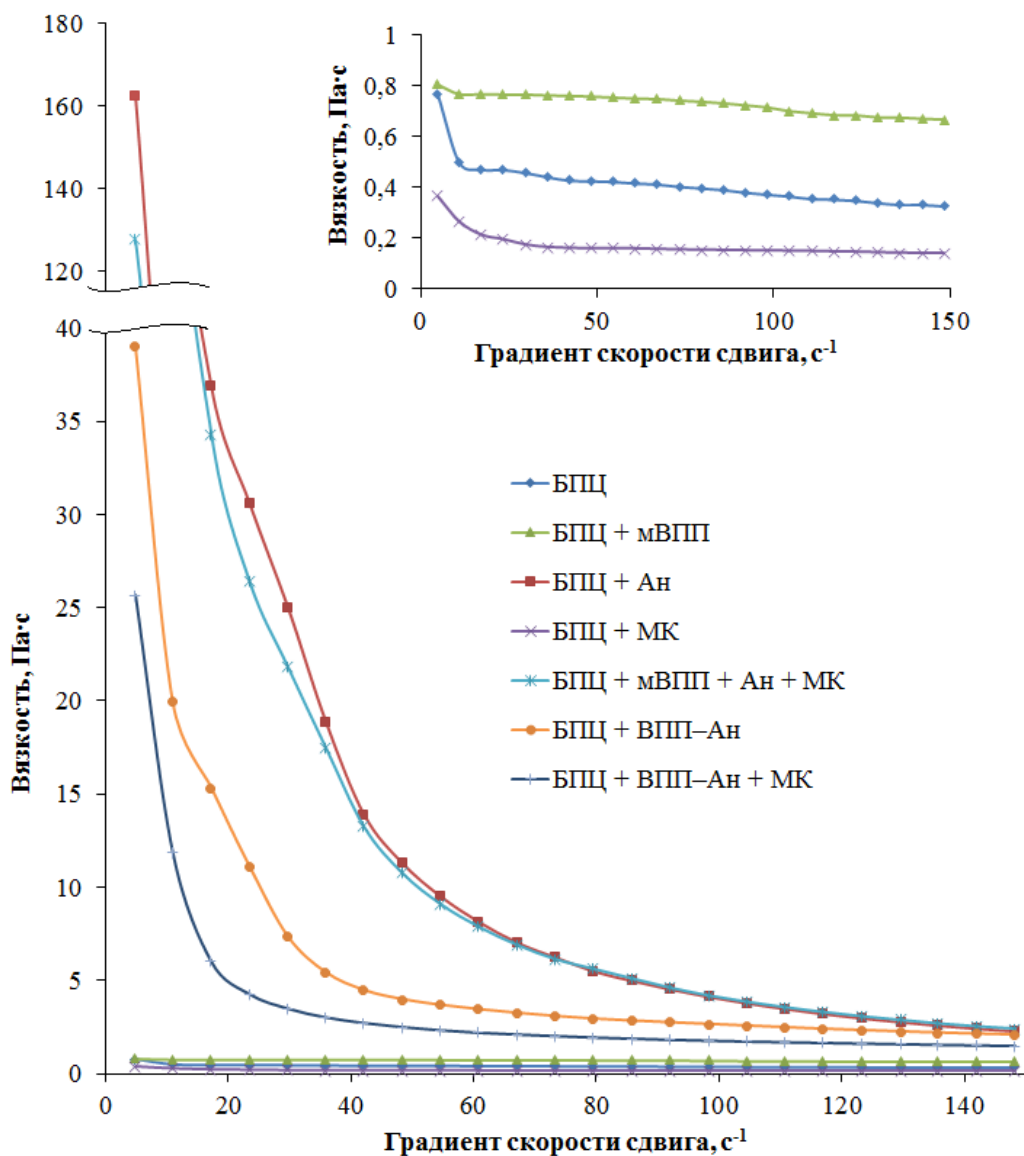


Рисунок 3.20 – Зависимость вязкости вяжущих смесей от градиента скорости сдвига (составы согласно таблице 3.12)

В совокупности с использованием микрокальцита (БПЦ + ВПП–Ан + МК) вязкость и напряжение сдвига суспензии дополнительно снижаются. Это позволило снизить расход воды для достижения требуемой удобоукладываемости

бетонной смеси и получить более плотную матрицу композита.

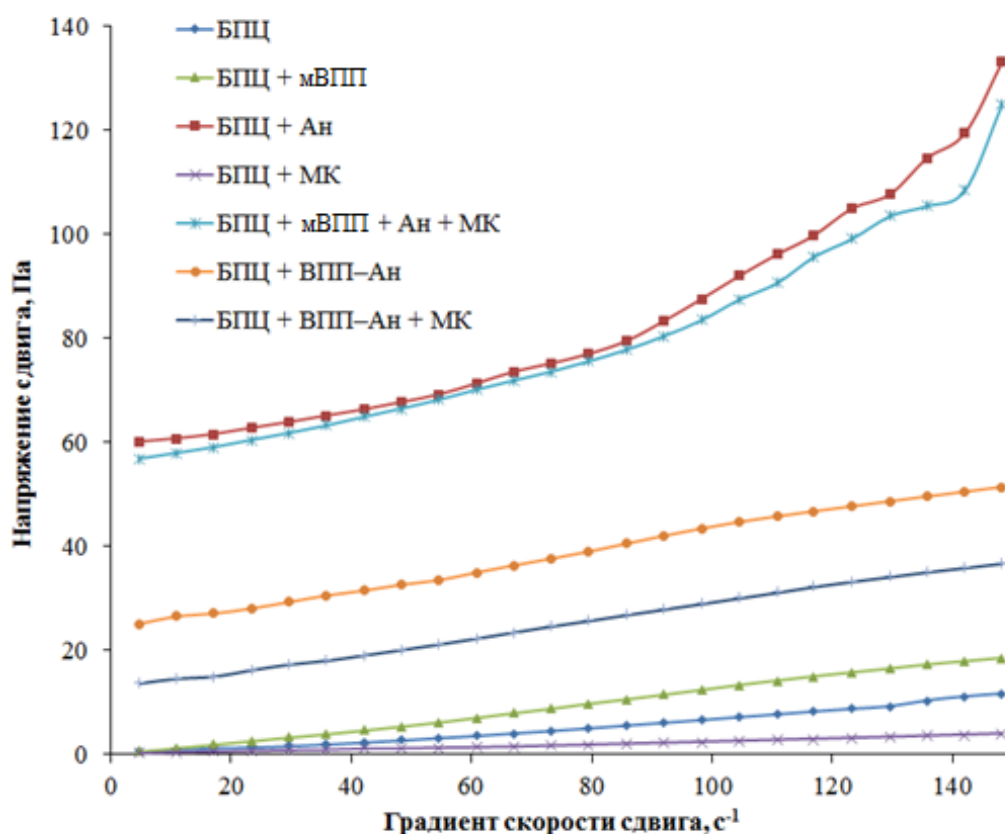


Рисунок 3.21 – Зависимость напряжения сдвига вяжущих смесей от градиента скорости сдвига (составы согласно таблице 3.12)

Для оценки влияния минеральных добавок на процессы гидратации цемента на ранних сроках использован метод изотермической калориметрии. Водовязущее отношение для всех смесей было равно 0,5. Дифференциальные и интегральные кривые тепловыделения вяжущих смесей, приведенные на рисунке 3.22, представлены в пересчете на 1 грамм белого портландцемента.

Сравнительный анализ дифференциальных кривых тепловыделения показывает, что при применении измельченного вспученного перлитового песка происходит незначительное замедление гидратации, выражающееся в смещении основного пика, соответствующего гидратации силикатов кальция, на 1 ч 40 мин относительно белого портландцемента (таблица 3.13). Однако для смеси с перлитом данный пик является более интенсивным, 21 Дж/г цемента·ч против 18

Дж/г цемента·ч для цемента без добавок. Также для системы с перлитом после основного пика отмечается отчетливое появление плеча и пика, которые могут быть связаны с образованием этtringита [181], либо отражать более плавное протекание процесса гидратации, в том числе, связанное с протеканием пуццолановой реакции – вторичного процесса гидратации [182]. Первоначальное замедление гидратации может быть обусловлено ограничением доступа воды к частицам цемента, ввиду развитой морфологии и высокой удельной поверхности частиц измельченного вспученного перлитового песка, а последующая интенсификация и выполаживание могут быть связаны с предоставлением большей поверхности для роста новообразований (эффект «затравки» кристаллизации) и постепенного высвобождения воды на поздних этапах гидратации, пуццолановой реакции.

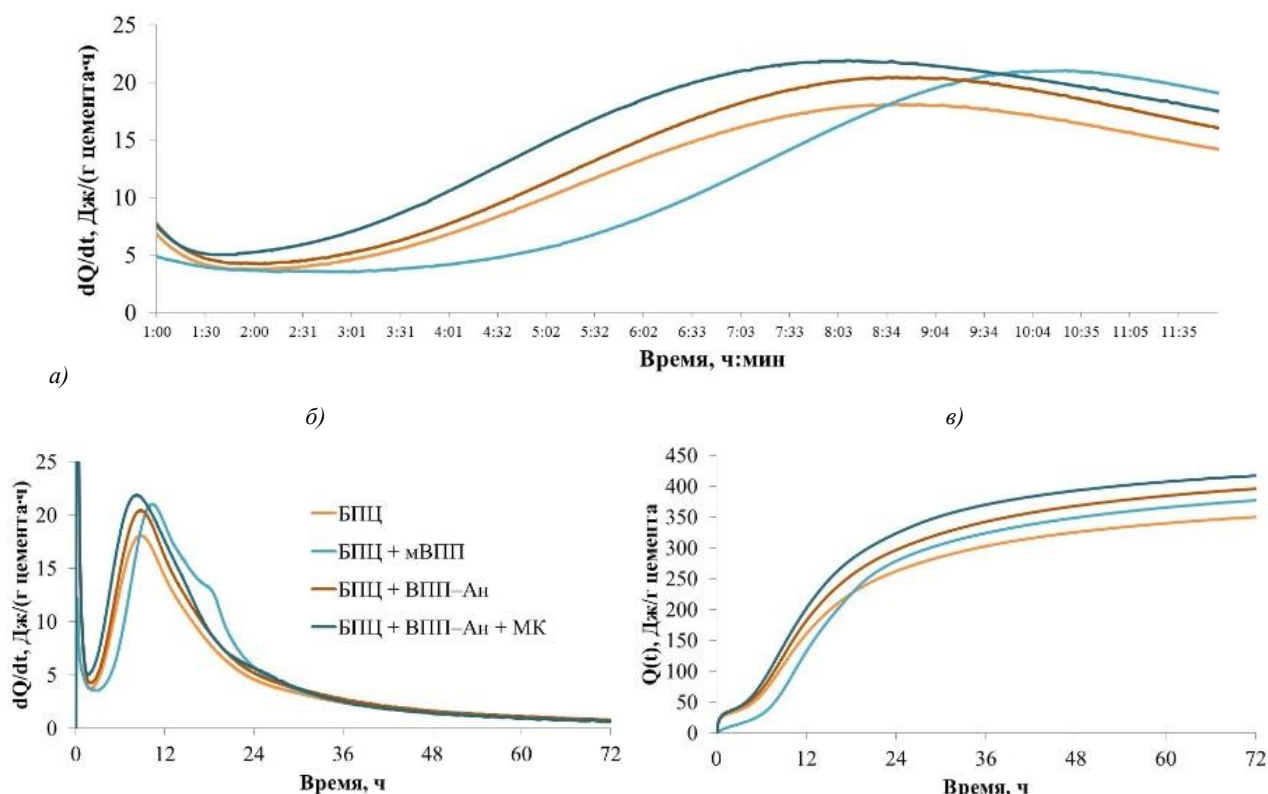


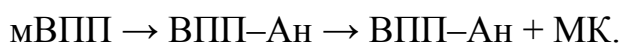
Рисунок 3.22 – Дифференциальные (а, б), интегральные (в) кривые тепловыделения при гидратации в зависимости от состава вяжущей смеси (в пересчете на 1 г белого портландцемента)

Использование добавки ВПП-Ан, полученной в результате совместного

помола вспученного перлитового песка с наноразмерным диоксидом титана привело к нескольким эффектам. Во-первых, можно отметить, незначительное ускорение начала основного этапа гидратации, что отражается в смещении возрастающей стороны пика на несколько минут влево (рисунок 3.22, а). Во-вторых, интенсивность основного пика выше, в сравнении с цементом без добавок, что говорит об интенсификации гидратации силикатов. В-третьих, основной пик тепловыделения является более растянутым во времени, что, как и в случае со вспученным перлитовым песком может свидетельствовать о вкладе в экзотермический эффект тепловыделения пуццолановой реакции. Ускорение и интенсификация основного этапа гидратации в случае использования добавки ВПП–Ан обусловлено снижением энергии активации процесса гидратации и увеличением числа центров кристаллизации, что ускоряет образование и рост гидратационных продуктов, что является известным эффектом от использования минеральных добавок [183–186]. При этом эффект временного удержания воды и замедления гидратации, который наблюдался в случае использования чистого вспученного перлитового песка, нивелирован в результате частичного покрытия поверхности перлита диоксидом титана (см. рисунок 3.12).

Еще в большей степени вышеуказанные эффекты наблюдаются при совместном использовании ВПП–Ан и микрокальцита, который обеспечивает дополнительную площадь поверхности для зародышеобразования и роста гидратированных фаз цемента, и дополнительно может участвовать в реакциях гидратации цемента с образованием гидрокарбоалюминатов и гидрокарбонатов кальция [187–189].

Таким образом, все указанные эффекты для всех использованных добавок привели к увеличению суммарного тепловыделения за 72 часа гидратации вяжущих (рисунок 3.22, б, таблица 3.13). По увеличению прироста тепловыделения добавки могут быть ранжированы следующим образом:



Результаты определения тепловыделения для исследуемых смесей согласуются с результатами определения сроков схватывания (см. таблицу 3.11).

Таблица 3.13 – Характеристики тепловыделения при гидратации
в зависимости от состава вяжущей смеси

Состав смеси	Основной пик гидратации			Тепловыделение за 72 ч, Дж/г цемента
	Время, ч:мин	dQ/dt (Дж/г цемента·ч)	Q(t) (Дж/г цемента)	
БПЦ – 100 %	8:35	18,11	104,77	350,12
БПЦ – 90 % мВПП – 10 %	10:06	21,01	94,51	377,53
БПЦ – 80 % ВПП–Ан – 20 %	8:35	20,47	118,39	395,61
БПЦ – 60 % ВПП–Ан – 20 % МК – 20 %	8:08	21,92	125,00	417,60

Сравнивая результаты определения прочности для различных составов вяжущей смеси (таблица 3.14) можно наблюдать, что использование мВПП и ВПП–Ан менее эффективно, чем ВПП–Ан с микрокальцитом.

Таблица 3.14 – Прочность вяжущего в зависимости от состава

№ п/п	Состав смеси	Прочность на сжатие/изгиб (МПа) в срок испытания			Удельная прочность на сжатие в возрасте 28 сут	Прочность на сжатие/изгиб после пропаривания, МПа
		3 сут	7 сут	28 сут		
1.	БПЦ – 100 %	<u>43,1</u> 6,0	<u>49,2</u> 6,8	<u>67,3</u> 7,7	0,115	<u>47,2</u> 6,7
2.	БПЦ – 90 % мВПП – 10 %	<u>37,7</u> 5,3	<u>42,7</u> 5,9	<u>64,1</u> 7,3	0,122	<u>49,3</u> 6,9
3.	БПЦ – 80 % ВПП–Ан – 20 %	<u>37,4</u> 5,2	<u>43,1</u> 6,1	<u>63,3</u> 7,1	0,135	<u>47,0</u> 6,6
4.	БПЦ – 60 % ВПП–Ан – 20 % МК – 20 %	<u>39,3</u> 5,5	<u>47,1</u> 6,7	<u>65,2</u> 7,5	0,185	<u>48,2</u> 6,8

Так замена 10 % белого портландцемента на измельченный вспученный перлитовый песок приводит к замедлению набора прочности, что выражается в снижении прочности на сжатие на 12,5 % и 13,2 % в 3 и 7 сутки, соответственно, по сравнению с исходным цементом. К 28 суткам различие снижается до 4,7 %. После тепловлажностной обработки прочность состава с мВПП превосходит контрольный без добавок на 4,2 %. Это обусловлено, во-первых, замедлением гидратации цемента в первые несколько суток в присутствии мВПП, что наблюдалось при исследовании тепловыделения, во-вторых, снижением содержания портландцемента, в-третьих, более интенсивным протеканием пуццолановой реакции при повышенной температуре.

Для состава с ВПП–Ан, несмотря на еще более сниженное содержание портландцемента, прочность на 3 и 7 сутки остается практически равной прочности состава с мВПП. Это обусловлено вкладом наноразмерных частиц анатаза в ускорение процессов гидратации и твердения в первые несколько суток. На 28 сутки прочность на сжатие снижается на 5,9 % по сравнению с цементом без добавок, что обусловлено как снижением содержания портландцемента, так и, возможно, некоторым снижением интенсивности пуццолановой реакции ввиду частичного экранирования поверхности частиц перлита. После пропаривания прочность образцов с ВПП–Ан практически равна прочности контрольных, что обусловлено протеканием пуццолановой реакции.

Определение прочностных показателей для состава с ВПП–Ан и микрокальцитом показало, что в данном случае, при значительной замене белого портландцемента на комплекс добавок (№ 4, таблица 3.14) не происходит большой потери прочности на сжатие и изгиб на всех исследованных сроках твердения (в возрасте 28 суток – снижение на 3 % прочности на сжатие, на 2,5 % прочности на изгиб), а после тепловлажностной обработки прочность на сжатие превосходит контрольный образец на 2 %, на изгиб – на 1,5 %).

Анализ удельной прочности образцов, то есть величины прочности, обеспечиваемой 1 кг цемента от общей массы твердых компонентов, показал, что несмотря на снижение расхода белого цемента, доля его вклада в значение

прочности растет.

Достижение высокой прочности при совместном использовании добавок может быть обусловлено формированием более монолитной и плотной структуры гидратационных продуктов на тонкодисперсных минеральных частицах, в том числе за счет продуктов пуццолановой реакции, заполнением микро- и нанопор инертными компонентами.

Таким образом, по результатам исследования тепловыделения при гидратации и кинетики набора прочности можно сделать вывод, что использование ВПП–Ан совместно с микрокальцитом приводит к более быстрому началу протекания основных реакций гидратации цемента, их более полному протеканию, сопровождающемуся пуццолановой реакцией, что приводит к более интенсивному тепловыделению и обеспечивает увеличение ранней прочности, а также сохранение прочности в возрасте 28 суток при замене 40 % портландцемента на добавки.

Полученные результаты согласуются с результатами определения минерального состава цементного камня на 28-е сутки твердения (рисунок 3.23). На дифрактограмме цементного камня из белого цемента без добавок (БПЦ) отмечаются пики, относимые к остаточным клинкерным минералам – алиту и белиту, и отражения, относимые к продуктам гидратации – C-S-H фазе, портландиту, этtringиту.

Использование молотого вспученного перлитового песка (БПЦ + мВПП) привело к замедлению гидратации, что отмечается в наличии более интенсивных пиков, относимых к алиту, белиту, этtringиту. Незначительно сниженное содержание портландита может быть также обусловлено замедлением гидратации, либо пуццолановой реакцией.

При использовании ВПП–Ан (БПЦ + ВПП–Ан) наблюдается уменьшение интенсивности пиков, относимых к клинкерным минералам. Содержание портландита остается практически неизменным. Отмечаются отражения, относимые к анатазу.

При совместном использовании ВПП–Ан и микрокальцита (БПЦ + ВПП–Ан

+ МК) наблюдается низкое содержание алита и белита, этtringита, что связано со значительным снижением содержания портландцемента, но также может быть обусловлено интенсификацией гидратации. Присутствие минеральных добавок отслеживается по отражениям анатаза и кальцита. Отслеживаются пики гидросиликатной фазы – тоберморита. Пониженное содержание портландита может быть связано как со снижением доли портландцемента, так и с протеканием пуццолановой реакции.

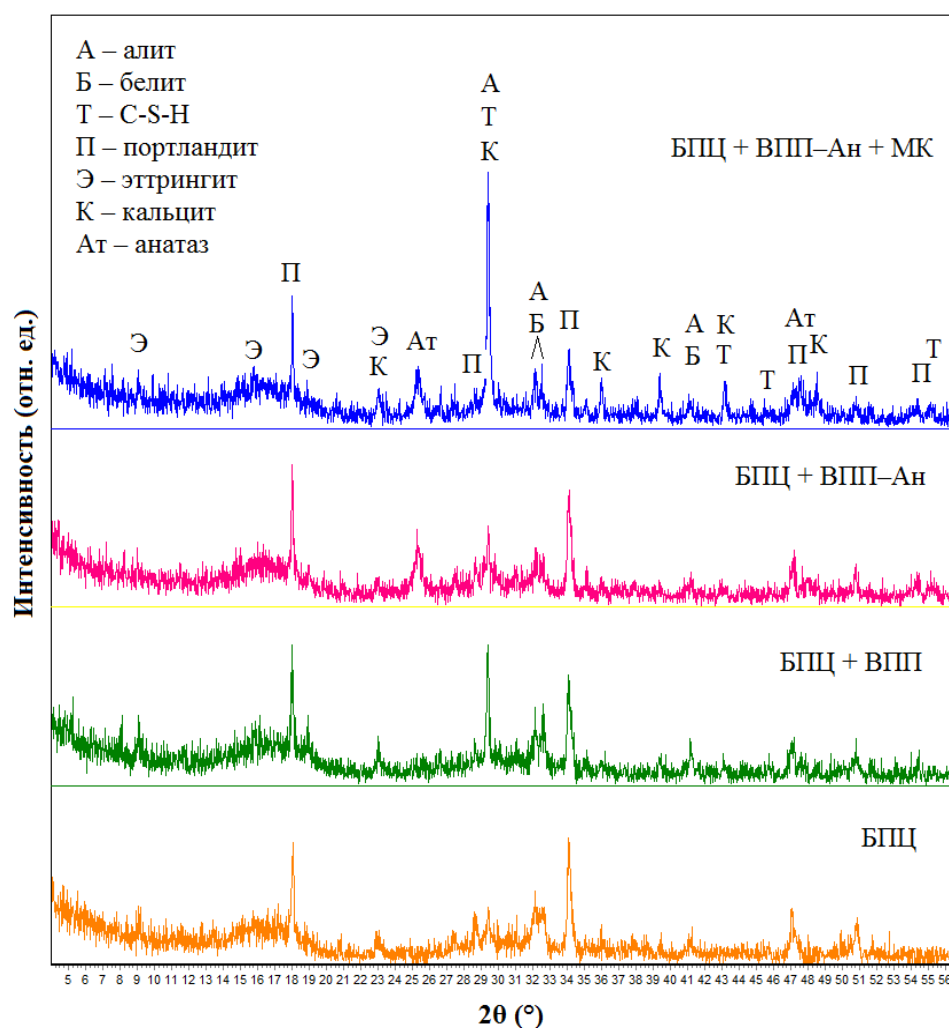


Рисунок 3.23 – Дифрактограммы цементного камня в возрасте 28 суток в зависимости от состава вяжущей смеси

Исследование микроструктурных особенностей цементного камня различного состава позволило отметить снижение микропористости и уплотнение матрицы при использовании минеральных добавок (рисунок 3.24).

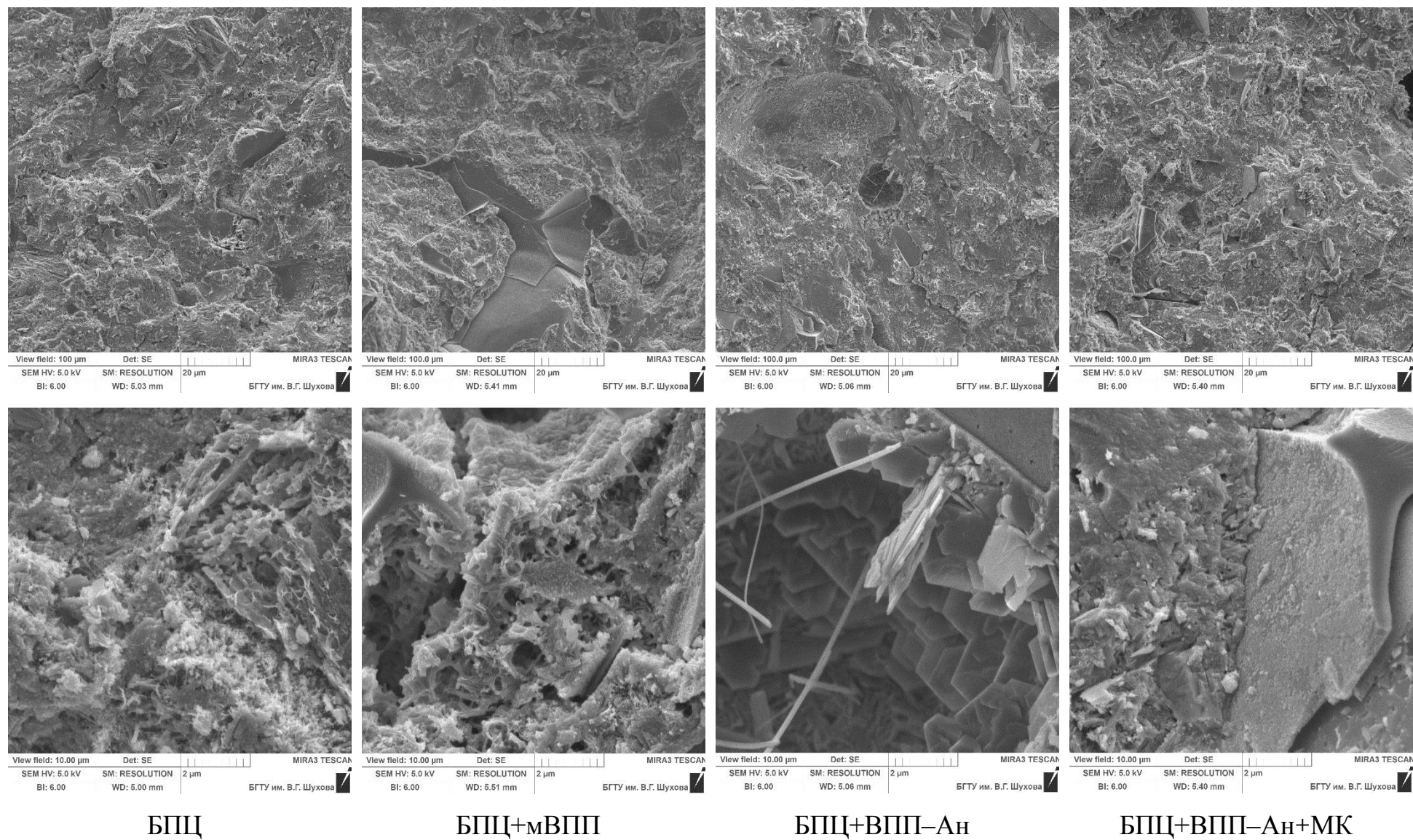


Рисунок 3.24 – Микроструктура цементного камня в возрасте 28 суток в зависимости от состава вяжущей смеси

В целом, во всех образцах имеются схожие новообразования различного размера и морфологии: игольчатые, столбчатые, слоистые, дендритоподобные. На частицах мВПП отмечается формирование наростов с развитой поверхностью, указывающих на протекание реакций с продуктами гидратации цемента и формирование развитой, но разуплотненной контактной зоны.

Более плотная микроструктура отмечается при использовании ВПП–Ан (см. рисунок 3.24). В разломе поры на поверхности частицы ВПП–Ан можно наблюдать активный рост новообразований различной морфологии. Добавление в систему микрокальцита при еще большем снижении содержания цементной составляющей не привело к значительному изменению характера микроструктуры: она выглядит плотной, развитой, с отчетливыми границами перлитовых частиц неправильной формы, частично провзаимодействовавших с компонентами цемента.

Рассматривая при большем приближении контактную зону цементного камня с ВПП–Ан и МК (рисунок 3.25) можно отметить развитую шероховатую поверхность вспученного перлитового песка, предварительно обработанного кислотой, а также скопление сферических частиц размером менее 100 нм, относимых к диоксиду титана.

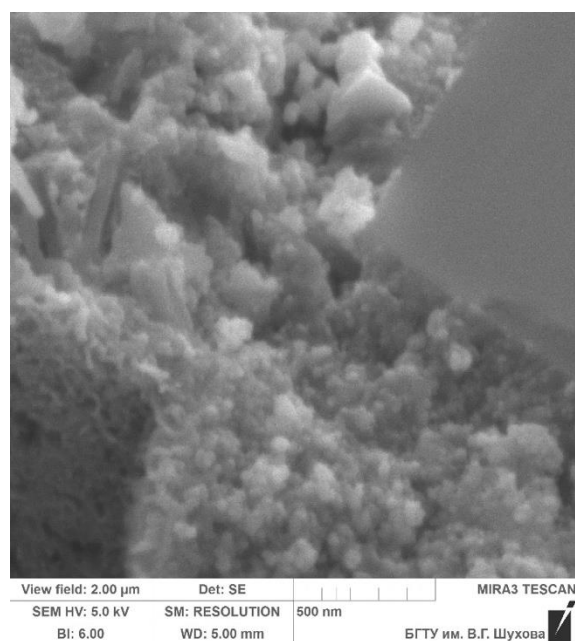


Рисунок 3.25 – Контактная зона цементного камня с ВПП–Ан и МК

При рассмотрении результатов картирования по химическим элементам образца БПЦ+ВПП–Ан+МК отмечается равномерное распределение титана в матрице образца и их скопление вблизи поверхности частиц перлита (рисунок 3.26).

Результаты определения удельной активной поверхности и распределения нанопор по методам БЭТ и БДХ (таблица 3.15, рисунок 3.27) показали большую удельную

активную поверхность и наличие большего объема нанопор у образца без добавок.

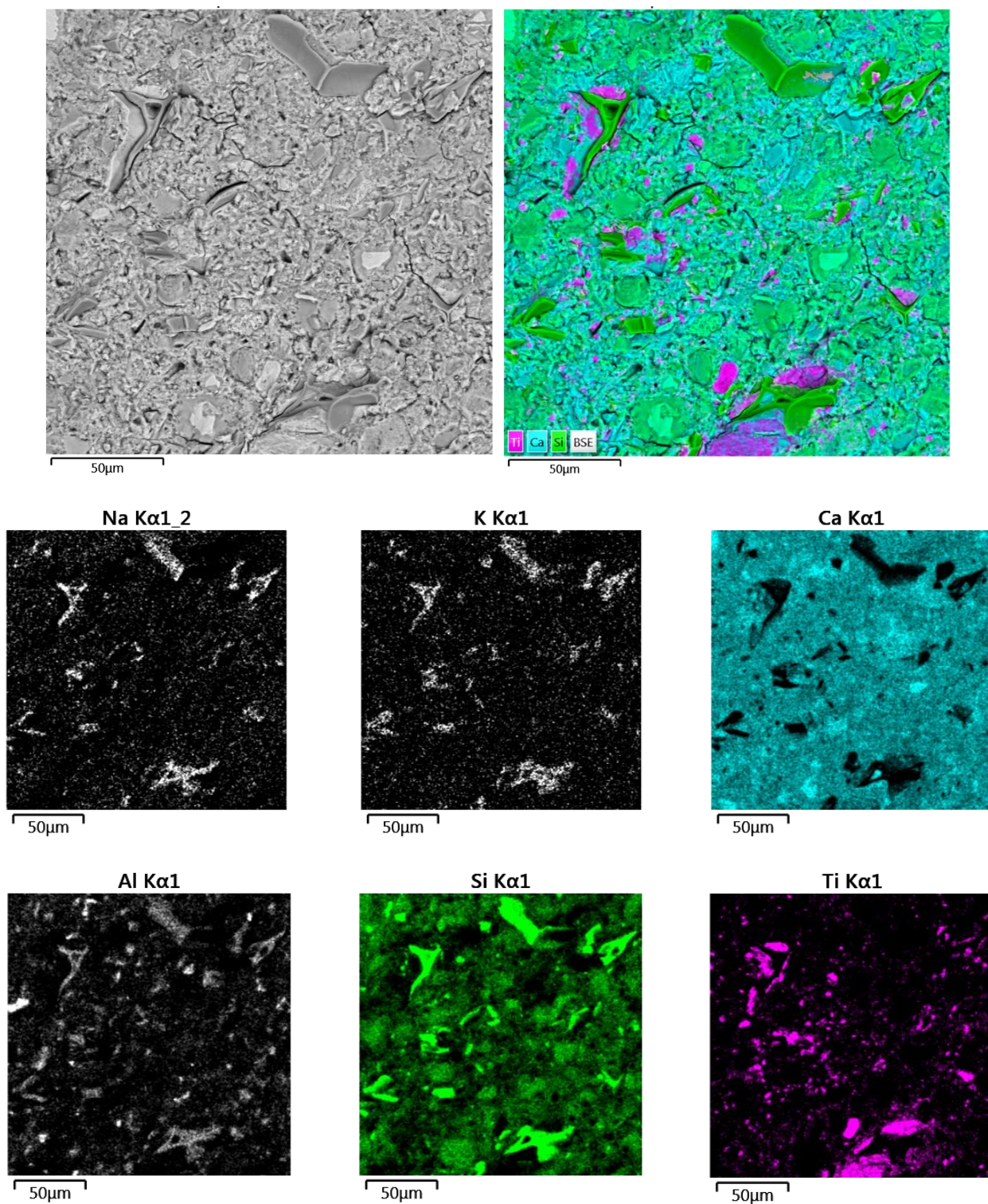


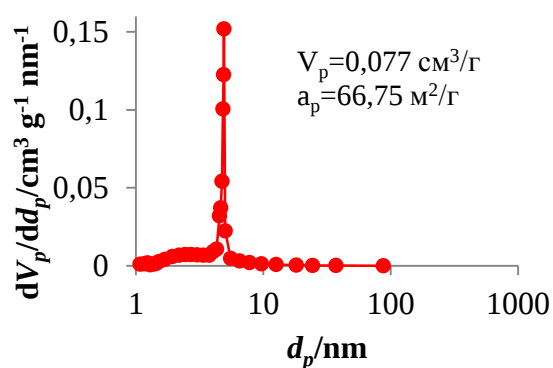
Рисунок 3.26 – Картирование по элементам цементного камня состава
БПЦ+ВПП–Ан+МК в возрасте 28 суток

Наименьшие значения данных показателей отмечаются для образца с мВПП. Низкое значение удельной активной поверхности в данном случае может являться

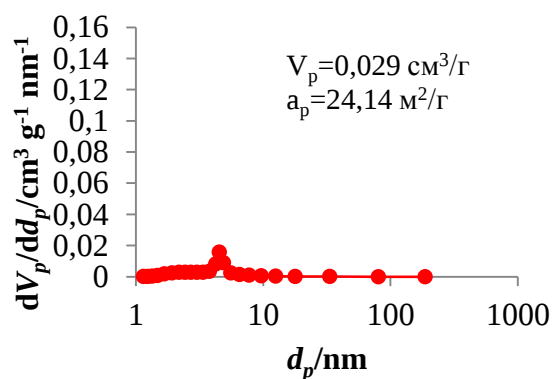
показателем неполной гидратации портландцемента, что согласуется с результатами, полученными другими методами для образца с мВПП. Присутствие анатаза на поверхности частиц ВПП (таблица 3.15, № 3) позволило уплотнить структуру, что отразилось на значениях удельной активной поверхности ($41,12 \text{ м}^2/\text{г}$) и общего объема пор ($0,053 \text{ см}^3/\text{г}$), которые они занимают промежуточное положение между цементным камнем без добавок и с мВПП.

Таблица 3.15 – Зависимость удельной активной поверхности и нанопористости (по БЭТ) цементного камня в возрасте 28 суток от состава вяжущей смеси

№ п/п	Состав смеси	Удельная активная поверхность материала, $\text{м}^2/\text{г}$	Общий объем пор, $\text{см}^3/\text{г}$	Средний диаметр пор, нм
1.	БПЦ – 100 %	62,06	0,078	5,02
2.	БПЦ – 90 % мВПП – 10 %	22,93	0,030	5,21
3.	БПЦ – 80 % ВПП–Ан – 20 %	41,12	0,053	5,20
4.	БПЦ – 60 % ВПП–Ан – 20 % МК – 20 %	37,84	0,050	5,25



а)



б)

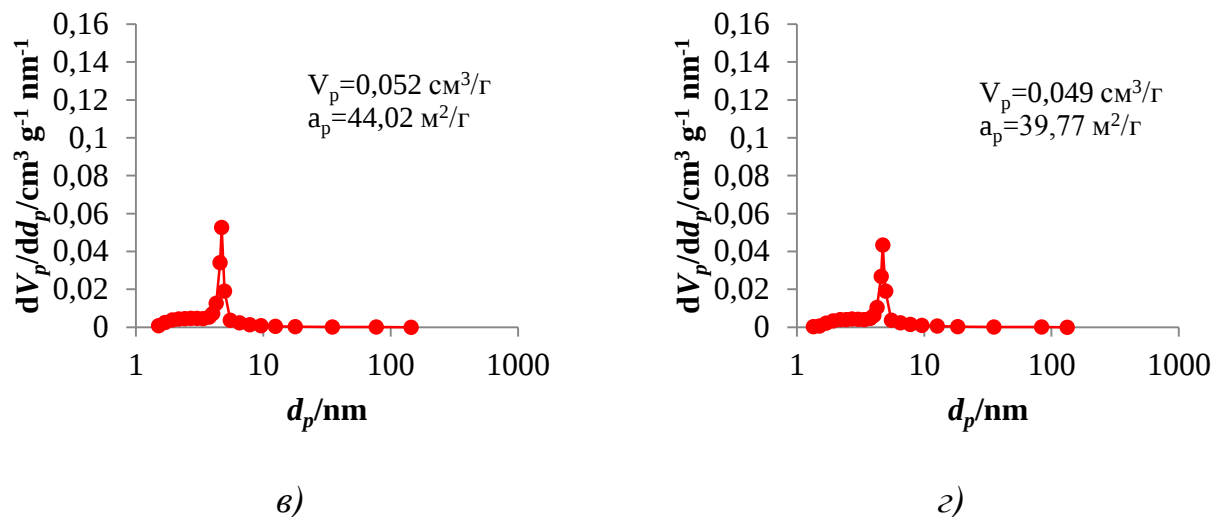


Рисунок 3.27 – Особенности распределения пор по размерам и значения удельной активной поверхности (метод Баррета-Джойнера-Халенды) в возрасте 28 суток в зависимости от состава вяжущей смеси:

а – БПЦ, *б* – БПЦ+мВПП, *в* – БПЦ+ВПП–Ан, *з* – БПЦ+ВПП–Ан+МК

Незначительно меньшие и близкие значения наблюдаются для образца с ВПП–Ан + МК. Снижение активной удельной поверхности (на 39 %) и суммарного объема нанопор цементного камня (на 36 %) в сравнении с составом без добавок указывает на кольматацию порового пространства как новообразованиями, так и компонентами добавок, выступающих микронаполнителями.

3.4 Выводы

1. Разработанная концепция дизайна исследования для проведения сегментированного эксперимента базируется на основании проведенного анализа классической и современной научной литературы в области строительного материаловедения, выявления имеющихся научных проблем и существенных прикладных задач в области химии вяжущих на белом цементе, технологии производства декоративных самоочищающихся мелкозернистых бетонов и тонкостенных изделий из них. Предложенный сегментированный эксперимент подразумевает всестороннее изучение процесса формирования структуры и

свойств мелкозернистого бетона с пониженным содержанием белого портландцемента для получения атмосферостойких тонкостенных изделий с фотокаталитическими свойствами. Полученные результаты будут способствовать решению задач по повышению эффективности производства мелкозернистых бетонов, долговечности получаемых изделий и улучшению архитектурного облика городской среды.

2. Рабочей гипотезой данного исследования стало предположение о том, что улучшение свойств (удобоукладываемости, прочности, способности к самоочищению, долговечности) мелкозернистого бетона для светлых тонкостенных изделий при пониженном расходе белого портландцемента может быть достигнуто за счет: синергизма кремнеземного (вспученный перлит) и карбонатного (микрокальцит) компонентов при рациональном их гранулометрическом составе и количественном содержании по отношению к вяжущему; предотвращения вымывания наноразмерного фотокатализатора в процессе эксплуатации изделий путем его предварительного закрепления на частицах кремнеземного компонента вяжущего.

3. Разработанный дизайн сегментированного эксперимента для подтверждения рабочей гипотезы включает в себя четыре основных этапа, каждый из которых базируется на комплексном анализе системы «состав – структура – свойства»: подготовка вспученного перлитового песка как компонента полифункционального композиционного материала; определение влияния комплекса минеральных добавок на свойства цементной системы; разработка состава мелкозернистого бетона; изучение атмосферостойкости мелкозернистого бетона. Декомпозиция исследования позволила систематизировать и оптимизировать процесс эксперимента, пробоподготовку, использование исследовательского оборудования и сырьевых материалов.

4. Показана возможность использования молотого вспученного перлитового песка, активированного в планетарной мельнице, в качестве активной добавки к белому цементу. Незначительное измельчение исходного пористого вещества позволяет повысить его физико-химическую активность. Это

обеспечивает условия для сохранения ключевых свойств белого цемента при снижении его расхода при замене на активную минеральную добавку.

5. После месяца выдерживания в модельной среде коэффициент биостойкости составил 0,80 для чистого цементного камня и 0,65 для цементного камня с добавкой вспученного перлитового песка. При продолжении экспозиции образцов в модельной среде до шести месяцев: у контрольного цементного камня дальнейшего падения средней прочности на сжатие не происходит, у образцов со вспученным перлитовым песком отмечается рост средней прочности на сжатие. Рентгеноаморфная составляющая вспученного перлита, являясь пуццолановоактивным компонентом, обеспечивает связывание свободного гидроксида кальция с образованием гидросиликатов кальция второй генерации, что и приводит к росту прочности цементной матрицы. По результатам оценки интенсивности роста гриба *Aspergillus niger* на поверхности материала цементный камень из белого портландцемента с добавкой вспученного перлитового песка проявил грибостойкость: под микроскопом прораствание спор и конидий не обнаружено. Полученные результаты позволяют рекомендовать исследованные материалы для изготовления тонкостенных изделий, для которых важными показателями качества являются высокие эксплуатационные и эстетические характеристики. Однако при разработке составов бетона с использованием вспученного перлитового песка рекомендуется предусмотреть меры по уплотнению структуры.

6. Доказана эффективность использования вспученного перлитового песка в качестве носителя фотокатализатора. Установлено, что предварительная кислотная обработка вспученного перлита 2%-м раствором щавелевой кислоты с последующим совместным помолом с диоксидом титана обеспечивает высокую концентрацию активных центров на поверхности частиц, пуццоланическую активность, формирование связей Ti–O–Si. Применение полученной добавки в составе вяжущего на основе белого портландцемента позволяет увеличить его фотокаталитическую активность по показателю удаления красителя Родамина Б на 30 % в сравнении с образцом, полученным смешением компонентов.

7. Предложен способ модификации вспученного перлитового песка, заключающийся в его предварительной кислотной активации с последующим совместным помолом с диоксидом титана, что обеспечивает получение полифункциональной добавки, проявляющей пуццолановую активность и фотокаталитические свойства. Установлено, что применение разработанной добавки позволяет снизить содержание белого портландцемента в составе вяжущего с сохранением высоких показателей прочности и декоративных характеристик, в том числе обеспечивает фотокаталитическую активность композита, что расширяет области его практического использования.

8. Выявлено, что совместное использование вспученного перлитового песка, измельченного с диоксидом титана, полидисперсного микрокальцита и поликарбоксилатного пластификатора в составе вяжущего на основе белого портландцемента позволяет снизить водопотребность смеси на 15 % (по сравнению с составом, где использована смесь мВПП и анатаза). Снижение негативного влияния наноразмерного анатаза на реотехнологические характеристики цементного теста обусловлено тем, что при его совместном помоле с ВПП обеспечивается разделение агрегатов и агломератов исходных компонентов, равномерное распределение отдельных частиц, что позволяет облегчить течение суспензии, снизить ее вязкость и напряжение сдвига. В совокупности с использованием микрокальцита вязкость и напряжение сдвига суспензии дополнительно снижаются, что связано с повышением эффективности действия поликарбоксилатного пластификатора в присутствии карбонатных частиц.

По результатам определения фазового состава и микроструктурных особенностей показано, что применение измельченного с диоксидом титана вспученного перлитового песка в комплексе с микрокальцитом способствует интенсификации процессов гидратации, снижению микропористости, повышению однородности и плотности цементного камня. Методом низкотемпературной адсорбции азота установлено снижение удельной поверхности и суммарного объема нанопор цементного камня на 39 % и 36 % соответственно в сравнении с составом без добавок, что указывает на коагуляцию порового пространства как

новообразованиями, так и компонентами добавок, выступающих микронаполнителями.

9. Установлено, что замена 40 % белого портландцемента на комплекс тонкодисперсных минеральных добавок, включающий вспученный перлитовый песок, совместно измельченный с диоксидом титана и микрокальцит, позволяет получить вяжущее с прочностью на сжатие 65,2 МПа в возрасте 28 суток нормального твердения. Показано, что присутствие минеральных добавок приводит к смещению основного пика тепловыделения при гидратации на 27 минут и повышению интенсивности тепловыделения на 21 % в сравнении с составом без добавок, что обусловлено эффектом зародышеобразования на поверхности высокодисперсных частиц и протеканием пуццолановой реакции. После тепловлажностной обработки прочность вяжущего на сжатие и изгиб превосходит контрольный образец на 2 и 1,5 %, соответственно.

10. Установлены закономерности влияния комплекса минеральных добавок на реологические параметры, кинетику тепловыделения, фазовый состав и микроструктуру цементного камня. Предложены оптимальные дозировки и гранулометрический состав комплекса минеральных добавок, включающего модифицированный вспученный перлитовый песок и микрокальцит, обеспечивающие: получение цементных паст с пониженным водопотреблением, ускорение начала основного периода гидратации, интенсификацию процессов фазо- и структурообразования, формирование плотной однородной структуры цементного камня, высокую фотокаталитическую активность. Разработанное вяжущее может быть использовано для получения декоративных мелкозернистых бетонов, применяемых в производстве самоочищающихся тонкостенных изделий.

4 РАЗРАБОТКА СОСТАВА И СВОЙСТВА БЕЛОГО МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА ДЛЯ САМООЧИЩАЮЩИХСЯ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

В современном строительстве и обустройстве городской инфраструктуры, в том числе рекреационных зон, актуальность набирают тонкостенные бетонные изделия и конструкции светлых оттенков, так как они одновременно отвечают требованиям декоративности, экологичности, простоты изготовления, возможности использовать местные материалы и реализовывать сложные дизайнерские проекты. При этом для вновь разрабатываемых материалов или при введении в состав бетонной смеси новых компонентов, остаются нерешенными вопросы подбора составов, обеспечивающих долговечность и сохранение декоративного внешнего вида при агрессивных атмосферных воздействиях.

С учетом малой толщины таких изделий для их изготовления применяется мелкозернистый бетон, который должен обладать в том числе повышенной атмосферостойкостью для эксплуатации вне помещений. Это связано с тем, что тонкостенные изделия в большей степени подвержены интенсивной циркуляции влаги, которая с течением времени приводит к потере декоративных характеристик и разрушению изделий. Интенсивная циркуляция влаги в том числе нежелательна для изделий с фотокатализатором, т.к. она не только может привести к его вымыванию из бетонной матрицы, но и к быстрой карбонизации поверхности, что способно экранировать, замедлять и останавливать процессы фотокаталитического очищения.

Требования к прочности и другим эксплуатационным характеристикам, предъявляемые к бетонам для тонкостенных изделий и конструкций, зависят от назначения и условий эксплуатации производимых элементов. Бетонная смесь для тонкостенных изделий должна обладать высокой удобоукладываемостью для обеспечения заполнения опалубки сложной формы без образования пустот, что может быть достигнуто подбором оптимального состава бетонной смеси с использованием пластификаторов.

Целью данного этапа работы являлась разработка и оптимизация состава бетонной смеси на основе предложенного вяжущего вещества для обеспечения высоких технико-эксплуатационных характеристик и атмосферостойкости бетона для тонкостенных изделий и конструкций.

4.1 Расчет и подбор состава белого мелкозернистого бетона для самоочищающихся тонкостенных изделий

Исходный состав мелкозернистого бетона определяли расчетно-экспериментальным методом по ГОСТ 27006-2019 «Бетоны, Правила подбора состава» и с учетом «Рекомендаций по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов» путем подбора цементно-водного отношения, доли мелкого заполнителя и расхода суперпластификатора, для достижения требуемой удобоукладываемости смеси [190, 191]. Смесь «белый портландцемент – ВПП–Ан – микрокальцит» в установленных оптимальных соотношениях (см. главу 3) рассматривали как вяжущую систему, относительно которой и с учетом активности которой подбиралось содержание мелкого заполнителя – мраморного отсева. Ввиду присутствия в составе бетонной смеси пуццоланового компонента – вспученного перлитового песка, для активизации пуццолановой реакции целесообразной является тепловая обработка изделий, что также учитывалось при расчете и подборе состава мелкозернистого бетона.

Полученный номинальный состав мелкозернистого бетона приведен в таблице 4.1.

Исходя из результатов расчета и подбора номинального состава бетонной смеси, отношение содержания заполнителя к вяжущему составило 2. Полученное значение отпускной и проектной прочности на сжатие – 45,5 и 60,7 МПа, соответственно. Стоит отметить, что полученные значения прочности являются достаточными для тонкостенных изделий, но состав бетонной смеси должен быть оптимизирован с целью снижения расхода вяжущего вещества.

Таблица 4.1 – Номинальный состав и свойства мелкозернистого бетона

Расход компонентов, кг/м³						Подвижность смеси (ОК), см	Прочность на сжатие*, МПа	
Вяжущее			Заполнитель	ПАВ	Вода		после ТВО (отпускная)	28 суток (проектная)
Белый портландцемент	ВПП–Ан	Микрокальцит						
384	128	128	1280	2,6	190	15 (ПЗ)	45,5	60,7

* – Образцы подвергали тепловлажностной обработке при 85 °С по режиму 3+6+2 ч.

Для оптимизации гранулометрического состава смеси использовалось уравнение Функа-Дингера [192–196]. При расчете гранулометрического состава, проводимого в программе Granumetrik 5.0, использовали фракции заполнителя, соответствующие стандартному набору сит по ГОСТ 8735–88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний», а также учитывали гранулометрический состав компонентов вяжущего (рисунок 4.1). Результаты расчетов представлены в таблице 4.2.

Для состава № 1 приведен результат автоматического подбора массовых долей всех компонентов с учетом их гранулометрии, обеспечивающий минимальное расхождение полученной кривой с эталонным составом. При расчете состава № 2 установлена массовая доля вяжущего, полученная в ходе определения номинального состава бетонной смеси (см. таблицу 4.1). При расчете состава № 3 установлена массовая доля вяжущего, соответствующая минимально рекомендуемому расходу портландцемента 320 кг/м³ при эксплуатации изделий в условиях переменного замораживания и оттаивания при сильном водонасыщении [197].

Пересчет процентного содержания компонентов в килограммах на 1 м³ бетонной смеси представлен в таблице 4.3. Расход суперпластификатора (ПАВ) и воды рассчитывались исходя из установленных ранее оптимальных отношений, и

затем корректировались на экспериментальных замесах с целью достижения одинаковой подвижности бетонной смеси.

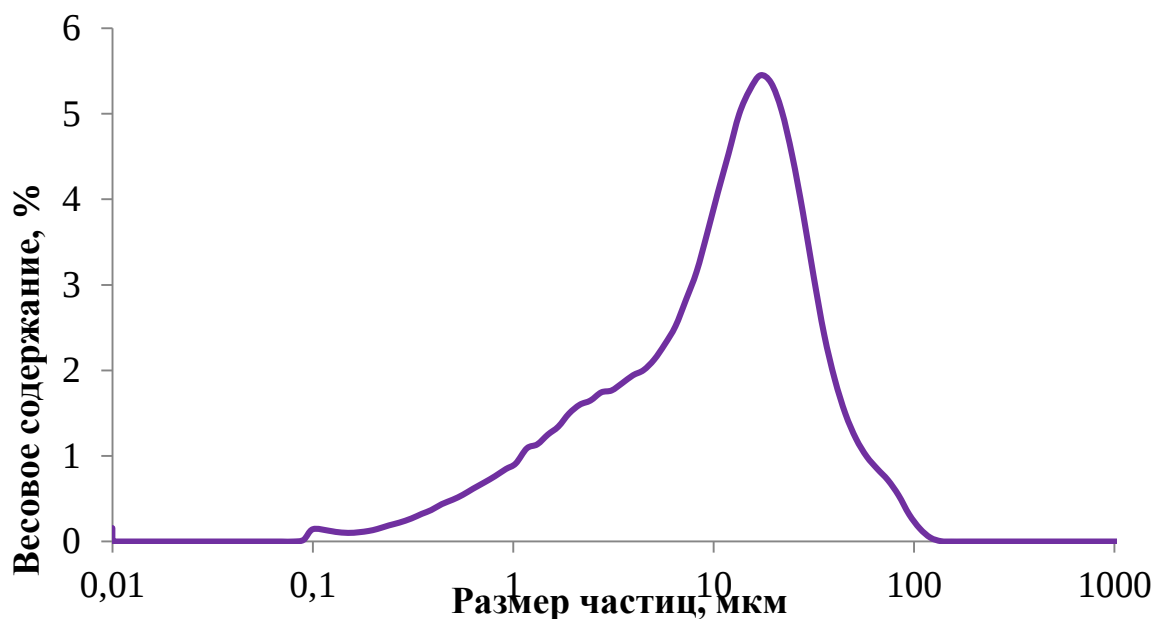


Рисунок 4.1 – Гранулометрический состав системы «белый портландцемент – ВПП–Ан – микрокальцит»

Таблица 4.2 – Оптимизированные составы сухих компонентов бетонной смеси в массовых долях, %

№ п/п	Вяжущее	Заполнитель	Фракция заполнителя, мм					Примечание
			0,16– 0,315	0,315– 0,63	0,63– 1,25	1,25– 2,5	2,5–5	
1	44,86	55,14	11,84	15,86	12,35	12,91	2,18	Результат автоматического подбора
2	33,33	66,67	18,93	12,11	16,41	18,36	0,86	Доля вяжущего в соответствии с номинальным составом
3	27,76	72,24	24,22	11,85	15,36	20,69	0,12	Минимальная доля вяжущего по рекомендациям ГОСТ 31384

Таблица 4.3 – Составы бетонной смеси

№ п/п	Расход компонентов, кг/м³										В/Ц	Подвижность смеси (ОК), см
	Вяжущее			Заполнитель (фракция), мм					ПАВ	Вода		
	Белый портландцемент	ВПП–Ан	Микрокальцит	0,16–0,315	0,315–0,63	0,63–1,25	1,25–2,5	2,5–5				
1н*	518	173	173	1061					3,4	238	0,46	15 (ПЗ)
1				228	305	238	248	42	3,2	233	0,45	15 (ПЗ)
2н	384	128	128	1280					2,6	190	0,49	15 (ПЗ)
2				363	233	315	353	16	2,4	180	0,47	15 (ПЗ)
3н	321	107	107	1392					2,3	167	0,52	14 (ПЗ)
3				467	228	296	399	2	2,1	160	0,50	14 (ПЗ)

* – буква «н» в номере состава означает, что мелкий заполнитель (мраморный отсев)

используется в нефракционированном виде.

При снижении массовой доли вяжущего относительно заполнителя при постоянном водоцементном отношении смеси становились менее пластичными и подвижными, т.к. именно цементная суспензия отвечает за текучесть смеси, в связи с чем, водоцементное отношение и содержание пластификатора относительно содержания белого портландцемента незначительно увеличиваются от состава № 1 к составу № 3.

Отмечено также, что водопотребность бетонной смеси меняется при использовании фракционированного и нефракционированного песка, и, в целом, использование фракционированного песка позволяет снизить водопотребность бетонной смеси при прочих равных условиях (таблица 4.3). Это обусловлено тем,

что в нефракционированном отсеве может присутствовать избыток мелких (пылевидных, ультрадисперсных) фракций, значительно сорбирующих воду, или избыток слишком крупных фракций, или же наблюдаются пробелы в определенных размерах, что приводит к менее плотной упаковке частиц и, соответственно, к большей межзерновой пустотности. Для заполнения этих пустот и обеспечения необходимой удобоукладываемости (подвижности) смеси требуется больше цементного теста, а значит, и больше воды. Использование же фракционированного песка обеспечивает максимально плотную упаковку частиц отсева, минимизируя межзерновую пустотность, для заполнения которой и обеспечения смазки частиц отсева требуется меньше цементного теста и воды. Это позволяет достичь требуемой удобоукладываемости бетонной смеси при пониженном расходе воды и ПАВ. Кроме того, в процессе фракционирования и промывки удаляется значительная часть тонких примесей, что также способствует снижению водопотребности.

Таким образом, использование фракционированного мраморного отсева позволяет снизить водоцементное отношение и расход ПАВ для достижения заданной удобоукладываемости, что в свою очередь, будет способствовать увеличению прочности, морозостойкости и долговечности бетона, а также является перспективным для экономии портландцемента.

4.2 Свойства белого мелкозернистого бетона для самоочищающихся тонкостенных изделий

Рассматривая результаты зависимости физико-механических характеристик бетона (таблица 4.4) от состава (см. таблицу 4.3) можно провести комплексный анализ влияния двух ключевых факторов на свойства мелкозернистого бетона: соотношения вяжущее/заполнитель и гранулометрического состава мелкого заполнителя.

В целом, для всех составов использование заполнителя, рассеянного по фракциям, позволяет повысить прочность, снизить водопоглощение по массе и

объем открытых капиллярных пор, что говорит об уплотнении матрицы и является, в том числе, следствием снижения водоцементного отношения.

Таблица 4.4 – Влияние состава бетонной смеси на характеристики мелкозернистого бетона

№* п/п	Содержание вяжущего / содержание заполнителя, %	Прочность на сжатие, МПа	Удельная прочность на сжатие	Прочность на изгиб, МПа	Водопоглощение по массе, %	Объем открытых капиллярных пор, см ³	Марка по морозостойкости
1н	44,86 / 55,14	70,9	0,14	7,8	2,8	6,0	F ₁ 300
1		81,3	0,16	9,5	2,6	5,6	F ₁ 400
2н	33,33 / 66,67	60,7	0,16	7,2	3,5	7,2	F ₁ 300
2		75,4	0,20	8,4	2,9	5,9	F ₁ 400
3н	27,76 / 72,24	41,2	0,13	4,6	5,9	9,4	F ₁ 100
3		57,9	0,18	6,7	4,0	8,2	F ₁ 200

* нумерация образцов согласно таблице 4.3

Состав № 1 характеризуется наилучшими показателями, т.к, содержание вяжущего в нем наибольшее, относительно других составов, а также наименьшее водоцементное отношение. Высокая доля вяжущего системы «белый портландцемент – ВПП–Ан – микрокальцит» в составе № 1 позволяет обеспечить плотную структуру композита на нано- и микроуровнях за счет наполняющего эффекта микрокальцита и продуктов пуццолановой реакции в присутствии вспученного перлитового песка. Это обеспечивает достижение пониженного водопоглощения и объема капиллярных пор, а также повышенной морозостойкости.

Анализ данных демонстрирует обратную зависимость между содержанием

вяжущего и прочностными характеристиками бетона. При снижении доли вяжущего с 44,86 % до 27,76 % наблюдается закономерное падение прочности на сжатие: для нефракционированных составов: с 70,9 МПа до 41,2 МПа (снижение на 41,9 %); для фракционированных составов: с 81,3 МПа до 57,9 МПа (снижение на 28,8 %). Аналогичная тенденция прослеживается для прочности на изгиб, где снижение составляет 41,0 % и 29,5 % соответственно. Анализ удельной прочности образцов, то есть величины прочности, обеспечиваемой 1 кг цемента в бетонной смеси, показал наилучшие значения для номинального состава с фракционированным заполнителем (состав № 2).

Проведем сравнительный анализ составов с нефракционированным (индекс "н") и фракционированным заполнителем. Применение отсева заполнителя по фракциям обеспечивает существенный прирост эксплуатационных характеристик: прочность на сжатие увеличивается на 14,7–40,5 % в зависимости от соотношения компонентов; прочность на изгиб возрастает на 16,7–45,7 %; водопоглощение снижается на 7,1–32,2 %; объем открытых капиллярных пор уменьшается на 6,7–12,8 %.

Наиболее значительный эффект от фракционирования наблюдается при минимальном содержании вяжущего (состав № 3), т.к. в данном случае доля заполнителя велика, что пропорционально влиянию на конечные характеристики композита.

Можно наблюдать обратную зависимость между содержанием вяжущего и показателями пористости. При уменьшении доли вяжущего водопоглощение возрастает с 2,8 % до 5,9 % для нефракционированных составов, что коррелирует с увеличением объема открытых капиллярных пор с 6,0 до 9,4 см³. При уменьшении доли вяжущего системы «белый портландцемент – ВПП–Ан – микрокальцит» и увеличении водоцементного отношения, матрица композита становится более пористой, что способствует циркуляции воды. Однако, использование фракционированного заполнителя позволяет нивелировать данный негативный эффект.

Полученные значения морозостойкости демонстрируют прямую зависимость

данной характеристик от плотности структуры бетона: составы с фракционированным заполнителем показывают повышение марки по морозостойкости на 100 циклов во всех исследованных составах, достигая максимального значения F_{1400} для составов с высоким содержанием вяжущего и фракционированным заполнителем.

Таким образом, фракционирование мраморного отсева выступило эффективным технологическим приемом, позволяющим существенно улучшить физико-механические характеристики мелкозернистого бетона без увеличения расхода вяжущего. Наибольший эффект от оптимизации гранулометрического состава заполнителя достигнут в бетоне с пониженным содержанием вяжущего, что открывает перспективы создания экономичных высокопрочных композитов. Полученные результаты подтверждают возможность направленного регулирования свойств мелкозернистого бетона путем оптимизации его структуры на уровне упаковки зерен заполнителя.

При необходимости достижения высоких физико-механических характеристик и с позиции оптимального соотношения «прочность – расход вяжущего» интерес представляет состав № 2 (номинальный) с фракционированным заполнителем, который обеспечивает высокую прочность на сжатие (75,4 МПа, что соответствует классу бетона В55) при умеренном расходе вяжущего, низкое водопоглощение 2,9 % и высокую морозостойкость (F_{1400}).

Тем не менее, состав № 3 с фракционированным заполнителем и минимальным содержанием вяжущего также показал высокие физико-механические характеристики. Достигнутая прочность на сжатие 57,9 МПа соответствует классу В40.

В нормативной документации нет требований к классу бетонной смеси для тонкостенных изделий, и выбираемый класс зависит от конкретного назначения, условий эксплуатации и проектных требований к изделию.

С учетом того, что предлагаемая вяжущая смесь цемента с минеральными добавками обеспечивает высокие физико-механические характеристики и с позиции стремления к снижению расхода вяжущего, для тонкостенных изделий

рекомендуется состав бетона № 3 с фракционированным заполнителем. При отсутствии возможности фракционирования заполнителя рекомендуется использование состава № 2 (номинального).

В результате разработаны составы мелкозернистого бетона на основе белого цемента, при его замене до 40 %, с классами прочности до В45, водопоглощением по массе не более 4 %, морозостойкостью до F300 (таблица 4.5), которые можно использовать для широкого спектра тонкостенных изделий.

Таблица 4.5 – Составы и свойства мелкозернистого бетона на основе белого цемента для тонкостенных изделий

№ п/п	Состав бетонной смеси, кг/м ³								Подвижность смеси (ОК), см	Свойства бетона				
	Вязущее	Фракция заполнителя, мм					Пластификатор	Вода		Прочность на сжатие/изгиб, МПа	Водопоглощение по массе, %	Марка по морозостойкости	Способность к самоочищению, %	
		0,16–0,315	0,315–0,63	0,63–1,25	1,25–2,5	2,5–5								
1	640	1280					2,6	190	15	60,7/7,2	3,5	F ₁₃₀₀	80	
2	535	467	228	296	399	2	2,1	160	14	57,9/6,7	4	F ₁₂₀₀	67	

Таким образом, оптимизация зернового состава заполнителя и состава бетонной смеси позволила повысить эксплуатационные характеристики бетона для тонкостенных изделий и конструкций за счет обеспечения оптимальной удобоукладываемости и более плотной структуры на различных масштабных уровнях композита. В случае необходимости повышения прочности на растяжение при изгибе, может быть использовано: дисперсное армирование, путем введения фибры в состав бетонной смеси, либо стержневое армирование с использованием

армирующих сеток и каркасов.

4.3 Атмосферостойкость белого мелкозернистого бетона для самоочищающихся тонкостенных изделий



Рисунок 4.2 – Моделирование атмосферных процессов в экстракторе Сокслета

Разработанный бетон предлагается к применению для получения тонкостенных изделий, эксплуатируемых вне помещений, что подразумевает постоянное воздействие на них атмосферных факторов, в том числе таких агрессивных, как переменное замораживание и оттаивание при сильном водонасыщении, возможное вымывание или экранирование поверхности фотокатализатора. При этом сохранение цвета, чистоты и целостности поверхности под действием таких атмосферных факторов в процессе эксплуатации является важным требованием для изделий, имеющих декоративное назначение.

В связи с этим, важным показателем возможности и обоснованности применения разработанного белого мелкозернистого бетона для самоочищающихся тонкостенных изделий является атмосферостойкость. Поэтому на следующем этапе работы проводилось изучение атмосферостойкости белого мелкозернистого бетона для самоочищающихся тонкостенных изделий.

Моделирование атмосферных процессов осуществляли с использованием циклического промывания образцов в экстракторе Сокслета (рисунок 4.2).

Предварительно взвешенные образцы контрольного и разработанного

составов бетона помещали в экстрактор Сокслета и подвергали циклическому процессу экстракции в автоматическом режиме [137, 138]. В колбу заливали дистиллированную воду и контролировали pH фильтрата каждые 24 часа в течение 30 суток.

Составы контрольного и разработанного образцов, которые были подвергнуты исследованиям, представлены в таблице 4.6. Разница заключается в том, что в контрольном составе молотый вспученный перлитовый песок и анатаз использованы отдельно, как это делают при использовании промышленных фотокатализаторов, а мраморный отсев не фракционирован. Для контрольного состава потребовалось значительно увеличить расход воды и ПАВ, чтобы достичь удобоукладываемости, требуемой для тонкостенных изделий, что связано с высокой дисперсностью наноразмерного анатаза и неоптимизированным гранулометрическим составом мраморного отсева.

Таблица 4.6 – Составы бетонной смеси для исследования атмосферостойкости

Вид образца	Расход компонентов, кг/м³											
	Вяжущее					Заполнитель (фракция), мм					ПАВ	Вода
	Белый портландцемент	ВПП–Ан	мВПП	Анатаз	Микрокальцит	0,16–0,315	0,315–0,63	0,63–1,25	1,25–2,5	2,5–5		
контрольный	321	–	53,5	53,5	107	1392					2,3	181
разработанный	321	107	–	–	107	467	228	296	399	2	2,1	160

Анализ результатов выдерживания образцов в приборе Сокслета показал, что рост pH инфильтрата образованного в процессе циркуляции воды (рисунок 4.3) обусловлен постепенной диффузией водорастворимых компонентов из пор бетона

в воду, к которым относят продукты растворения свободной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$; щелочи из цемента Na_2O , K_2O ; продукты частичного растворения гидратных фаз.

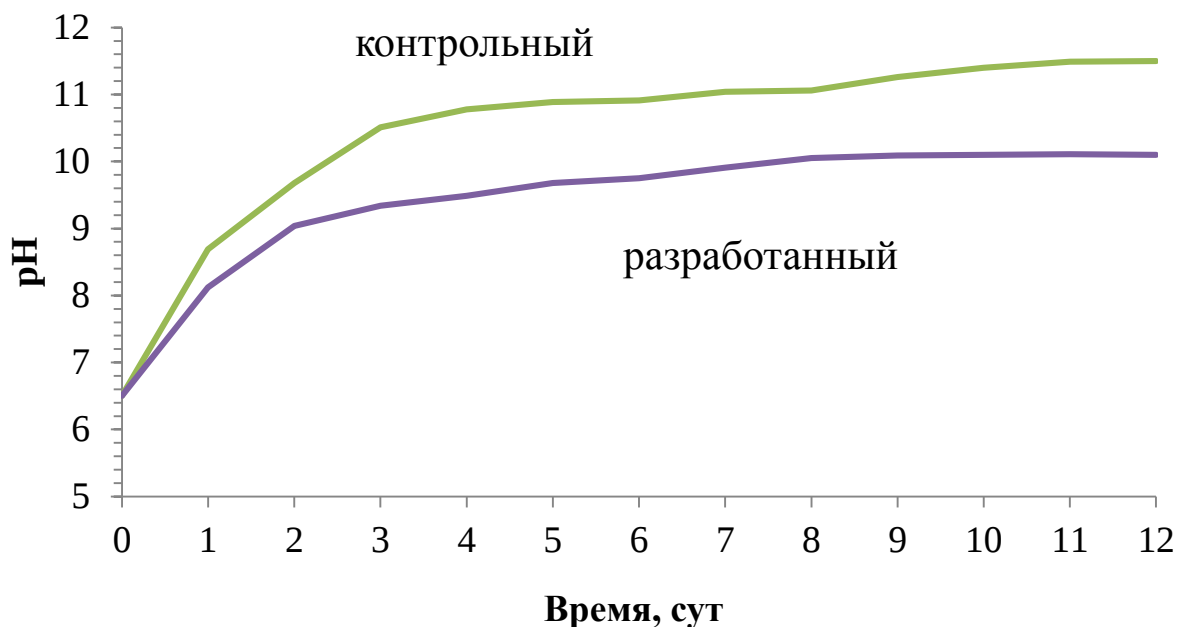


Рисунок 4.3 – Изменение pH инфильтрата образцов в процессе испытания на приборе Сокслета

Интенсивное вымывание водорастворимых компонентов наблюдается в первые 2–3 суток. Можно отметить, что у разработанного образца, интенсивность нарастания pH меньше, что обусловлено более плотной структурой, достигнутой как рассевом заполнителя по фракциям, так и снижением водопотребности бетонной смеси в результате применения комплекса ВПП–Ан вместо отдельного использования мВПП и наноразмерного анатаза.

У контрольного образца, где анатаз и мВПП вводились отдельно и не фракционирован заполнитель, наблюдается бóльшая потеря массы (3,15 % против 1,47 %) и бóльшее снижение прочности относительно исходных образцов (до помещения в экстрактор) (6,20 % против 2,95 %) (таблица 4.7), а также бóльшее повышение pH инфильтрата (до 11,5 против 10,1). Это обусловлено меньшей плотностью структуры, и, следовательно, более интенсивной циркуляцией воды в порах образцов с более интенсивным вымыванием растворимых компонентов.

Таблица 4.7 – Характеристики образцов после испытания на приборе Сокслета

Наименование показателя		Состав бетона	
		Контрольный (мВПП + Ан, без отсева заполнителя)	Разработанный («ВПП–Ан», оптимизированный состав заполнителя)
Масса образцов, г	до испытания	60,8	61,5
	после испытания	58,9	60,6
Уменьшение массы образцов, %		3,15	1,47
Прочность на сжатие, МПа	до испытания	47,8	71,7
	после испытания	44,8	69,6
Уменьшение прочности на сжатие, %		6,20	2,95

Анализ результатов элементного картирования поверхности бетона с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (рисунок 4.4) показал сохранение содержания титана после 30 дней непрерывной циркуляции воды через образец (титан отображен пурпурным цветом).

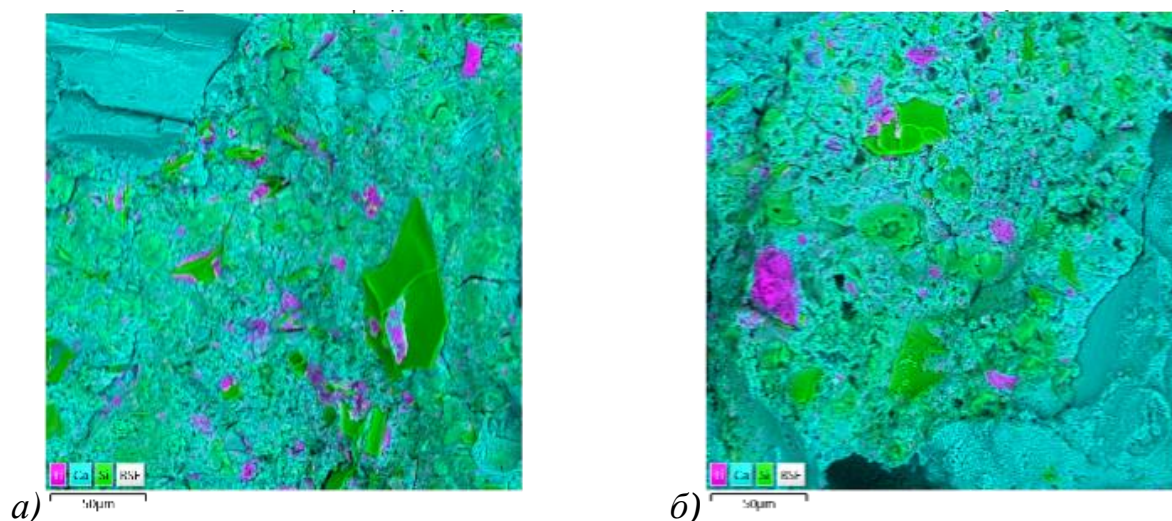


Рисунок 4.4 – Картирование поверхности разработанного мелкозернистого бетона по химическим элементам: *а* – до моделирования атмосферных процессов, *б* – после моделирования

Моделирование в экстракторе Сокслета позволило выявить относительное снижение содержания Ca, Si, Al, S и щелочных элементов (Na, K) при одновременной карбонизации поверхности (увеличение содержания C, O) (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Весовое содержание химических элементов на поверхности образца разработанного мелкозернистого бетона до (1) и после (2) моделирования, %

№ п/п	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
1	8,01	50,64	0,29	0,17	1,62	7,14	0,89	0,06	0,31	26,96	3,78	0,13
2	12,17	52,72	0,15	0,19	1,27	5,85	0,33	0,03	0,18	23,87	3,16	0,07

Наиболее интенсивному вымыванию подвергаются сульфатные фазы (снижение содержания S на 62,9 %) и щелочные компоненты (снижение Na и K на 48 и 42 %, соответственно). Резкое снижение содержания серы с 0,89 % до 0,33 % является наиболее выраженным изменением среди всех элементов. Это может указывать на интенсивное растворение этtringита ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) и свидетельствует о высокой уязвимости сульфатсодержащих фаз к воздействию циркуляции дистиллированной воды. Снижение содержания натрия (с 0,29 % до 0,15 %) и калия (с 0,31 % до 0,18 %) показывает вымывание растворимых щелочей из структуры бетона. Данный процесс является одним из первичных при контакте бетона с водой и связан с высокой растворимостью щелочных соединений, их присутствием в поровой жидкости.

Снижение содержания Ti с 3,78 % до 3,16 % (на 16,4 %) и Fe с 0,13 % до 0,07 % (на 46,15 %) может быть связано с относительным перераспределением элементов вследствие изменения состава поверхностного слоя.

Стоит отметить, что поверхность мелкозернистого бетона является полиминеральной, поликомпонентной и полиморфоструктурной (с развитой структурой поверхности) на всех масштабных уровнях, элементный состав которой

отличается от точки к точке в контексте исследования с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Кроме того, получаемый элементный состав в спектре является относительным, в частности, при увеличении доли карбонизации, содержание других компонентов относительно уменьшается, что не позволяет делать однозначные выводы о составе бетонной матрицы в процессе эксперимента. Тем не менее, по результатам проведенных исследований (содержанию титана) можно наблюдать, что ВПП–Ан удерживается в бетонной матрице после многократной фильтрации воды через бетонную матрицу (один цикл накопления и слива воды занимал около 3 часов, а весь процесс моделирования осуществлялся 720 часов), даже после наблюдения разрыхления матрицы на отдельных участках поверхности (см. рисунок 4.4, б).

Микроструктура исходного образца разработанного бетона (рисунок 4.5, а, б) характеризуется высокой плотностью. В цементной матрице наблюдается плотная упаковка продуктов гидратации и микронаполняющих компонентов. Видимая пористость минимальна, что коррелирует с данными таблицы 4.4 о низком водопоглощении бетона (4 %). Четко различимы частицы мраморного заполнителя с характерной угловатой формой, обеспечивающей хорошее сцепление с матрицей. Контактная зона между заполнителем и цементной матрицей плотная, без видимых зазоров и отслоений, что свидетельствует о хорошей адгезии. На рисунке 4.5, б при большем увеличении различимы плотные участки C-S-H геля, развитая поверхность продуктов гидратации, остаточные частицы вспученного перлитового песка. В целом для образца характерна компактная структура без выраженной капиллярной пористости.

После моделирования атмосферных воздействий (рисунок 4.5, в–е) на поверхности образца наблюдается формирование плотного слоя карбонатов (рисунок 4.5, в, г), что затрудняет оценку микроструктурных особенностей образца. Точечно можно наблюдать (рисунок 4.5, д) некоторое увеличение пористости в приповерхностной зоне, местами появление рыхлой, губчатой структуры. Тем не менее, бетонная матрица сохраняет свою структуру монолитной, где составляющие компоненты имеют плотную контактную зону (рисунок 4.5, е).

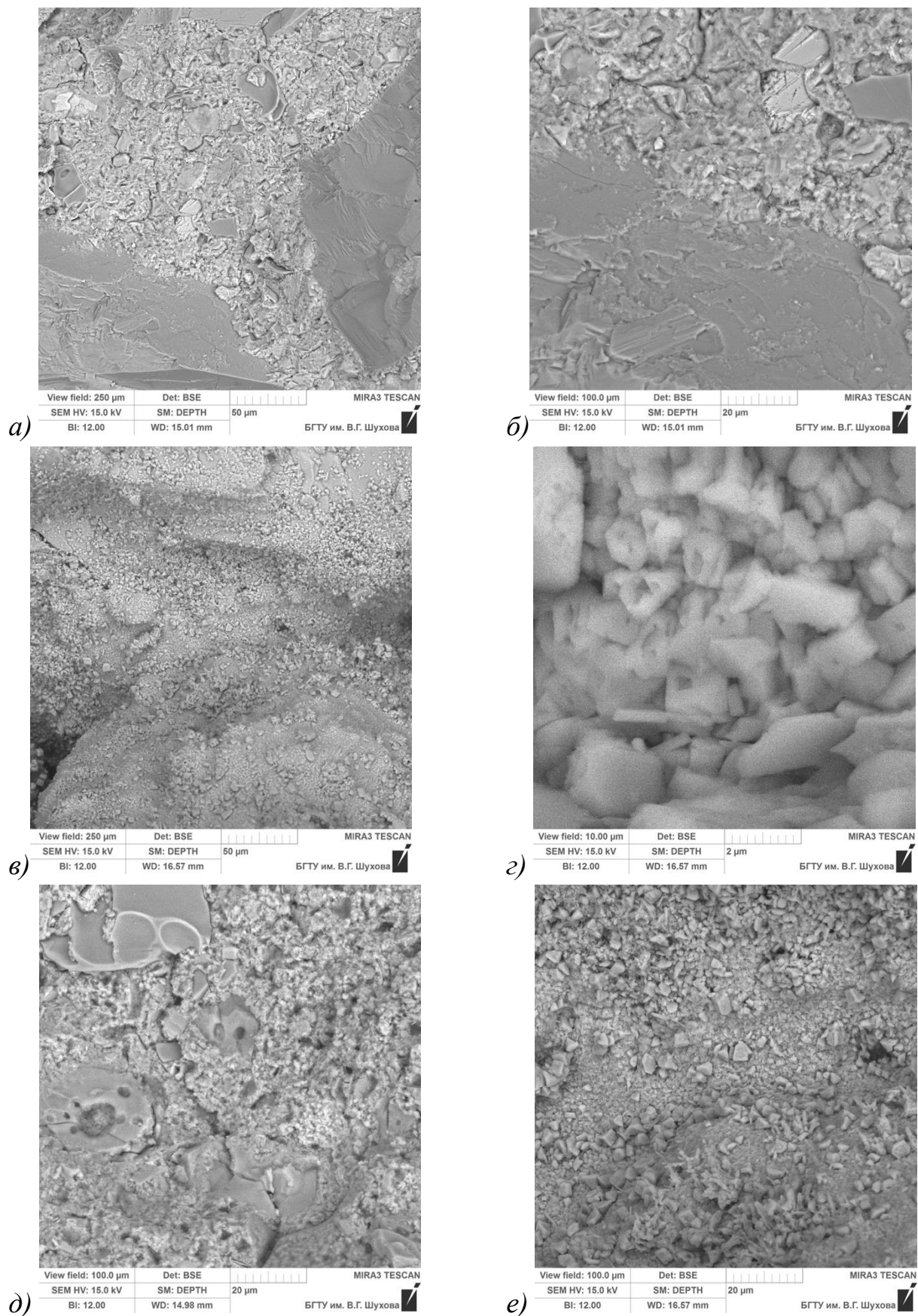


Рисунок 4.5 – Микроструктурные особенности бетонной матрицы до (а, б) и после (в–е) моделирования атмосферных процессов

4.4 Фотокаталитическая активность белого мелкозернистого бетона для самоочищающихся тонкостенных изделий

Для оценки исходной способности к самоочищению разработанного бетона и проверки ее сохранения после моделирования атмосферных процессов, в том числе с целью исключения негативного влияния экранирования поверхности фотокатализатора формируемыми карбонатами кальция и вымывания анатаза, проведены исследования фотокаталитической активности мелкозернистого бетона контрольного и разработанного составов до и после моделирования атмосферных воздействий.

Согласно методике ГОСТ Р 57255–2016 «Бетоны фотокаталитически активные самоочищающиеся. Технические условия», заключающейся в оценке очищения поверхности бетона от олеиновой кислоты после УФ-облучения, бетон считается самоочищающимся, если ее разложение происходит не позднее чем через 80 часов.

Анализируя результаты определения способности к самоочищению мелкозернистого бетона по методике оценки изменения краевого угла смачивания по данному нормативному документу (таблица 4.9), можно наблюдать, что и контрольный, и разработанный образцы проявили способность к самоочищению: достижение окончательного краевого угла смачивания у контрольного образца (с 71° до 28°) достигнуто за 36 часов, у разработанного за 32 часа (с 75° до 22°). При одинаковом массовом содержании диоксида титана, образец разработанного бетона, содержащий предложенный в работе полифункциональный композиционный материал ВПП–Ан, проявил большую способность к самоочищению, чем отдельное введение пуццолановой добавки и промышленного фотокатализатора, что подтверждает эффективность осаждения анатаза на поверхность вспученного перлитового песка. Преимущество введения в бетон фотокатализатора в осажденном на вспученный перлитовый песок виде, приводящее к повышению способности к самоочищению, может быть обусловлено рядом факторов: предотвращением агломерации наночастиц анатаза и

повышением дисперсности, улучшенным распределением и гомогенностью в бетонной матрице, повышением долговечности и стабильности фотокатализатора за счет химической связи Ti–O–Si, улучшенным взаимодействием с УФ-излучением в присутствии частиц вспученного перлитового песка.

Таблица 4.9 – Способность к самоочищению мелкозернистого бетона, оцененная по методике оценки изменения краевого угла смачивания по ГОСТ Р 57255–2016

Характеристика образца бетона	Краевой угол		Время достижения, ч
	Начальный	Окончательный	
Контрольный	До моделирования		
	 71 °	 28 °	36
	После моделирования		
	 108 °	 49 °	52
Разработанный	До моделирования		
	 75 °	 22 °	32
	После моделирования		
	 84 °	 26 °	36

По полученным результатам (см. таблицу 4.9) можно также наблюдать, что

после моделирования атмосферных воздействий у образцов значительно повышается исходный краевой угол смачивания: с 71° до 108° (на 52 %) у контрольного образца, и с 75° до 84° (на 12 %) у разработанного. Это может быть связано с увеличением шероховатости поверхности в результате ее разрыхления и/или формирования кристаллов карбоната кальция (см. рисунок 4.5, в). И сравнивая интенсивность изменения исходного краевого угла смачивания у контрольного и разработанного образцов можно косвенно сказать, что шероховатость у контрольного образца увеличилась в бóльшей степени. Это согласуется с результатами определения характеристик образцов после испытания на приборе Сокслета (см. таблицу 4.7) и обусловлено меньшей плотностью структуры бетонной матрицы контрольного образца.

Время достижения окончательного краевого угла смачивания у контрольного образца увеличилось до 52 часов после моделирования атмосферных воздействий (до моделирования данный период составлял 36 часов, разница – 16 часов), и окончательный краевой угол составил 49° (до моделирования – 28°). Это свидетельствует о том, что процесс самоочищения замедлился, и эффективность самоочищения снизилась, что связано с вымыванием или экранированием анатаза карбонатами в результате многократной циркуляции воды через образцы).

У образца разработанного мелкозернистого бетона после моделирования атмосферных воздействий время достижения окончательного краевого угла смачивания (26° против 22° до моделирования) увеличилось с 32 до 36 часов (время, равное интервалу между отдельными измерениями – 4 часа). Данные значения являются близкими к образцу, который не подвергался моделированию атмосферных воздействий, что показывает, что разработанный бетон проявляет высокую способность к самоочищению в том числе после моделирования атмосферных воздействий, и позволяет рекомендовать его для получения самоочищающихся тонкостенных изделий.

Для подтверждения данных выводов, фотокаталитическая активность образцов мелкозернистого бетона также было определена с помощью методики, оценивающей разложение органического красителя родамина Б. Согласно данной

методике, материал считается самоочищающимся если процент самоочищения больше 50 % после УФ-облучения в течение 26 часов.

Визуальная оценка результатов (рисунок 4.6) показывает высокую эффективность самоочищения образцов контрольного и разработанного бетона до моделирования атмосферных процессов. Изначально ярко пурпурная поверхность в результате нанесения родамина Б практически обесцветилась до исходного белого цвета за 26 часов УФ-облучения. Можно также наблюдать бóльшую однородность поверхности разработанного образца, что говорит о гомогенном распределении сырьевых компонентов бетонной смеси. После моделирования атмосферных процессов образец контрольного состава продемонстрировал меньшую эффективность самоочищения, что согласуется с результатами метода с олеиновой кислотой. У образца разработанного мелкозернистого бетона после моделирования атмосферных процессов эффективность самоочищения также снижается, но незначительно, что также согласуется с результатами гостированной методики.

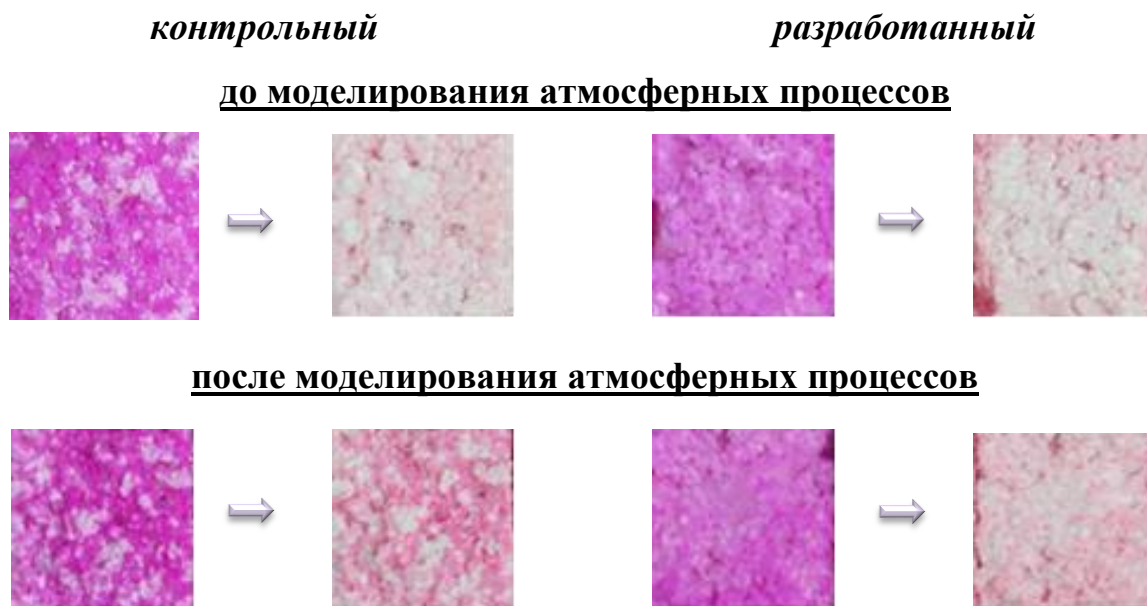


Рисунок 4.6 – Эффективность самоочищения (удаления родамина Б после 26 часов УФ-облучения) мелкозернистого бетона

Результаты количественной оценки эффективности самоочищения поверхности бетона по методике с красителем до и после моделирования

атмосферного воздействия представлены на рисунке 4.7.

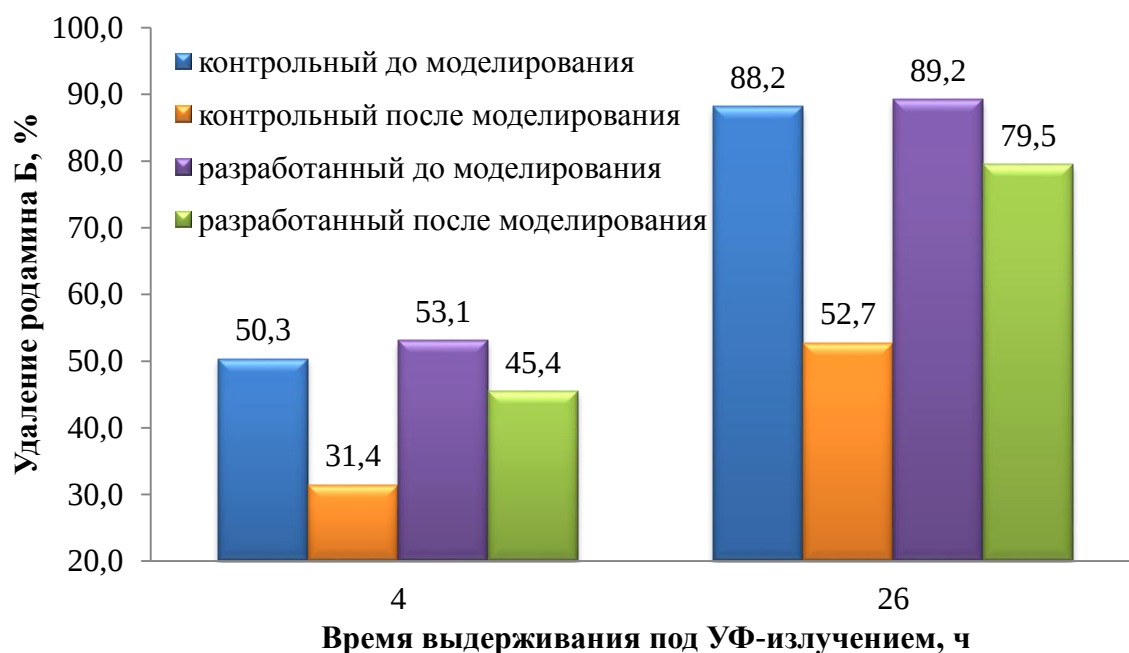


Рисунок 4.7 – Эффективность самоочищения (удаления родамина Б после 4 и 26 часов УФ-облучения) мелкозернистого бетона

Процент обесцвечивания родамина Б у контрольного и разработанного образцов до моделирования атмосферного воздействия очень близок: через 4 часа УФ-облучения – 50,3 % и 53,1 %, соответственно; через 26 часов – 88,2 % и 89,2 %. Это свидетельствует об их высокой фотокаталитической активности. Однако, после моделирования атмосферных процессов, фотокаталитическая активность контрольного образца значительно падает. Она составляет 31,4 % через 4 часа (снижение на 37 % относительно исходного) и 52,7 % через 26 часов (снижение на 40 % относительно исходного). У разработанного образца после моделирования атмосферных процессов фотокаталитическая активность через 4 часа УФ-облучения снизилась на 14,5 % (с 53,1 % до 45,4 %), через 26 часов – на 10,8 % (с 89,2 до 79,5 %), что, тем не менее, позволяет констатировать высокую фотокаталитическую активность бетона.

Показано, что у контрольного образца мелкозернистого бетона (с использованием наноразмерного анатаза без закрепления на ВПП) после моделирования атмосферных процессов способность к самоочищению снижается

более чем в 1,5 раза, что обусловлено вымыванием фотокатализатора и экранированием его поверхности карбонатами. У разработанного бетона снижение способности к самоочищению составляет около 10 %, так как фотокатализатор удерживается в матрице за счет химических связей, образованных с ВПП.

С целью расширения номенклатуры изделий для производства которых может быть использован разработанный бетон, исходная способность к самоочищению с использованием методики с обесцвечиванием родамина Б определена также для остальных образцов разработанных составов (см. таблицу 4.3), в том числе при их вертикальном расположении относительно источника УФ-излучения (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Эффективность самоочищения (в %) (удаления родамина Б после 26 часов УФ-облучения) мелкозернистого бетона в зависимости от состава

№* п/п	Содержание вяжущего / содержание заполнителя, %	В/Ц	Расположение относительно источника УФ-излучения	
			горизонтальное	вертикальное
1н	44,86 / 55,14	0,46	93,5	88,4
1		0,45	92,1	87,5
2н	33,33 / 66,67	0,49	91,0	80,1
2		0,47	90,3	79,0
3н	27,76 / 72,24	0,52	89,9	69,3
3		0,50	89,2	67,0

* нумерация образцов согласно таблице 4.3

Анализ полученных результатов показывает, что при снижении доли вяжущего, следовательно, снижении доли диоксида титана в составе бетона, эффективность самоочищения бетона снижается для составов с фракционированным заполнителем с 92,1 % до 89,2 %, а с нефракционированным – с 93,5 % до 89,9 %. Это говорит о том, что даже при относительно низком содержании ВПП–Ан процесс фотокатализа идет эффективно ввиду достаточного

содержания анатаза в приповерхностном слое. Высокая доступность анатаза, а следовательно эффективность фотокаталитического очищения для составов с меньшим содержанием вяжущего также обусловлена меньшей плотностью формируемой структуры в результате увеличенного водоцементного отношения, что упрощает проникновение УФ-излучения к поверхности частиц анатаза. В свою очередь, рассев заполнителя приводит к повышению плотности бетона, что снижает доступ УФ к поверхности фотокатализатора. Поэтому в составах с нефракционированным заполнителем, где пористость матрицы повышена, наблюдается незначительное увеличение фотокаталитической активности, например с 89,2 до 89,9 % для состава с наименьшим содержанием вяжущего.

Вертикальное расположение образцов приводит к снижению способности к самоочищению бетона ввиду снижения доступа УФ-излучения к фотокатализатору. Это наиболее заметно в составах с наименьшим содержанием анатаза. Так для состава № 3, при вертикальном расположении образцов снижение фотокаталитической активности составило 25 % (снижение с 89,2 до 67 %). У номинального состава (2н) при большей доле фотокатализатора снижение фотокаталитической активности при вертикальном расположении составило 12 % (с 91,0 до 80,1 %). Тем не менее, данные образцы предложенных составов считаются фотокаталитически активными и могут быть рекомендованы для получения изделий не только горизонтального, но и вертикального расположения, например, фасадных панелей, со способностью к самоочищению 67 % (состав 3) и 80 % (состав 2н, номинальный).

4.5 Выводы

1. Установлены закономерности влияния состава бетонной смеси на ее подвижность. Так оптимизация гранулометрического состава мелкого заполнителя (мраморного отсева) с использованием уравнения Функа-Дингера позволила снизить водопотребность бетонной смеси на 5–7 % и расход суперпластификатора на 8–13 % для достижения требуемой подвижности ПЗ, что обусловлено

достижением плотной упаковки частиц и минимизацией межзерновой пустотности.

2. Разработаны составы мелкозернистого бетона с различным соотношением вяжущее/заполнитель (от 44,86/55,14 до 27,76/72,24), при этом показано, что использование фракционированного мраморного отсева позволяет снизить водоцементное отношение для всех составов, обеспечивает повышение прочности на сжатие на 14,7–40,5 % и снижение водопоглощения на 7,1–32,2 % по сравнению с нефракционированным, при этом наибольший эффект (повышение прочности на 40,5 %) достигается при минимальном содержании вяжущего.

3. Разработаны составы мелкозернистого бетона на основе белого цемента, при его замене до 40 %, с классами прочности до В45, водопоглощением по массе не более 4 %, морозостойкостью до F300 для широкого спектра тонкостенных изделий, характеризующиеся устойчивостью к вымыванию водорастворимых соединений и фотокатализатора и способностью к самоочищению до 80 %.

4. Моделирование атмосферных воздействий в экстракторе Сокслета показало, что разработанный бетон с использованием полифункционального композиционного материала ВПП–Ан демонстрирует снижение потери массы в 2,14 раза (1,47 % против 3,15 %) и прочности в 2,10 раза (2,95 % против 6,20 %) по сравнению с контрольным составом, что обусловлено формированием более плотной структуры с пониженной проницаемостью.

5. Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии установлено сохранение содержания титана на поверхности бетона после моделирования атмосферных процессов, при этом наблюдается преимущественное вымывание сульфатных фаз (снижение содержания S на 62,9 %) и щелочных компонентов (снижение Na и K на 48 % и 42 % соответственно), что свидетельствует об удержании фотокатализатора в матрице за счет химических связей Ti–O–Si.

6. Экспериментально установлено, что введение фотокатализатора в виде композиционного материала ВПП–Ан обеспечивает повышение способности к самоочищению по сравнению с отдельным введением компонентов (время

достижения окончательного краевого угла смачивания 32 ч против 36 ч), что обусловлено предотвращением агломерации наночастиц анатаза и их равномерным распределением в объеме бетона.

7. После моделирования атмосферных воздействий разработанный бетон сохраняет 89 % исходной фотокаталитической активности (снижение с 89,2 % до 79,5 % по методике с родамином Б), в то время как контрольный состав теряет 40 % активности, при этом даже состав с минимальным содержанием вяжущего обеспечивает эффективность самоочищения 67 % при вертикальном расположении образцов, что позволяет рекомендовать его для изготовления фасадных панелей.

5 ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ БЕЛОГО ЦЕМЕНТА ДЛЯ САМООЧИЩАЮЩИХСЯ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

5.1 Архитектурно-дизайнерские решения для тонкостенных изделий из мелкозернистого бетона на основе белого цемента

Современная городская среда в процессе урбанизации с каждым годом подвергается все большему воздействию негативных факторов: загазованность, промышленное загрязнение, выбросы отопительных систем. Выделяемые в воздух вещества, такие как оксиды азота, углекислый газ и твердые частицы оказывают отрицательное воздействие не только на здоровье человека, но и ухудшают внешний облик городов и других населенных пунктов. Загрязнение поверхностей архитектурных объектов является значимой проблемой, которая стимулирует развитие направления разработки и применения самоочищающихся строительных материалов.

С целью расширения областей применения разработанного мелкозернистого бетона рассмотрим формы и архитектурные решения изделий с учетом оценки актуальности их применения в ландшафтном дизайне и фасадных системах зданий.

Применение в парковой архитектуре

Каждый ландшафтный проект проходит несколько стадий и этапов проектирования (в каждой из этих стадий есть множество задач и вопросов): инициирование, планирование, реализация и закрытие. Тесное междисциплинарное сотрудничество на этапе проектных исследований позволяет грамотно подойти к выбору растительности на объекте, гармонично сочетать ландшафт и стиль окружающих его зданий и сооружений, а также выбрать строительный материал для тонкостенных изделий и малых архитектурных форм, отвечающий всем современным требованиям.

Концепция устойчивого строительства [198] ориентирована на важность

экологически безопасного использования материала на протяжении всего жизненного цикла изделия. Этот цикл начинается от максимально рационального использования ресурса материала на этапе изготовления изделия и заканчивается последующей утилизацией. Однако, немаловажно максимально использовать ресурс объекта в течение всего его жизненного цикла. Уменьшение загрязнений архитектурных объектов в процессе их эксплуатации не только продлевает его срок службы, но и обеспечивает более чистую и здоровую среду обитания человека.

Обустройство парковых территорий и рекреационных зон само по себе предусматривает создание благоприятной атмосферы для человека, живущего в жестком ритме города. А правильный выбор строительного материала, используемого в ландшафтном дизайне, является одним из основных показателей уровня комфортности.

Использование атмосферостойкого самоочищающегося бетона является решением многих проектных задач, стоящих перед ландшафтным дизайнером. Мелкозернистый бетон – это материал, который позволяет создавать изделия любой формы, а белый цвет идеально вписывается в природный ландшафт [199]. Моделирование разнообразных форм рельефа, подпорных стенок, лестниц, пандусов, террас и различной городской мебели из такого бетона дает возможность встраивать в парковую среду функциональные, социальные, культурно-развлекательные элементы с интересным декором.

Актуальность использования белых бетонов с функцией самоочищения обусловлена следующими причинами:

1. Эстетика: улучшение визуального пространства за счет внедрения в окружающую парковую среду камней, скал, булыжников, рокариев, альпинариев, изготовленных из белоснежного бетона с блестящими вкраплениями мрамора. Атмосфера красоты и гармонии сочетается с возможностью самоочищения от загрязнений.

2. Функциональность: проектирование сооружений и малых форм из бетона, который в том числе подходит для тонкостенных конструкций, позволяет зонировать парковые и дворовые территории, обеспечивать комфорт и

безопасность пользователей. Монолитные бетонные клумбы могут служить ограничителями проезжей части от пешеходной зоны, а вазоны и парковочные барьеры могут использоваться при концепции «двор без машин». Возможность самоочищения бетона от выделяемых в воздух от автомобилей газов – важный фактор при выборе материала для подобных малых форм.

3. Организация пространства: любой парковый или дворовой ландшафт делится на тематические, функциональные или возрастные зоны. В каждой зоне актуальны свои элементы – скамейки и фонтаны в зоне отдыха и рекреации, садовые и пешеходные дорожки или их ограждения в прогулочных зонах, арт-объекты и беседки на детских площадках (рисунок 5.1).

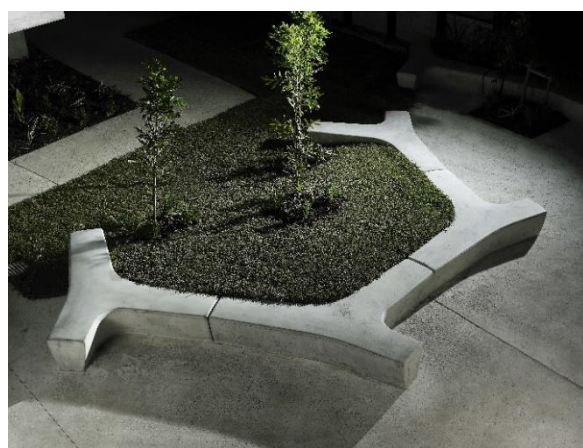


Рисунок 5.1 – Примеры использования бетона в ландшафтном дизайне

Важную роль в выборе материала для проектирования объектов, находящихся в свободном доступе, также является антивандальность, или возможность быстрого и легкого очищения поверхности. Совокупность всех этих

факторов делает применение разработанного бетона в парковом и ландшафтном дизайне весьма актуальным.

Применение для фасадных материалов

При выборе решения о способе применения разработанного бетона большую роль сыграло расположение готового изделия, а именно необходимость попадания солнечного света на объект. Фасады зданий и сооружений, особенно высотных зданий, идеально подходят для эффективного и рационального использования самоочищающихся бетонов. Городские районы с наибольшим загрязнением воздуха – это «уличные каньоны» (оживленные дороги, окруженные небоскребами), которые накапливают вредные оксиды азота и другие загрязнители. Загрязняющие вещества из выхлопных систем приводят к почернению и дорогостоящей чистке стен и фасадов зданий, что делает применение разработанного бетона еще и экономически эффективным.

Большую популярность бетон, как материал для фасадных элементов здания приобрел при строительстве многоэтажных гостиничных комплексов на побережьях России и за рубежом. Гостиница «Жемчужина» в г. Сочи, санаторий «Дружба» в г. Ялте – яркие примеры активного использования бетона в прошлом столетии. Активное солнце, песок и морской воздух, насыщенный солями, активно способствует разрушению и загрязнению фасадов. Но при этом применение на таких объектах фотокаталитических бетонов может быть наиболее эффективно за счет сильной солнечной активности (рисунок 5.2).

Современные экстерьерные дизайнерские решения требуют большой вариативности в текстурах материала. Бетон может использоваться в совершенно различных стилях – от минималистичного и кричащего до классического традиционного, придать зданию изюминку. Фактура фасада здания из бетона может быть создана не только с помощью штамповой печати, например, «дерево», «короед», «камень», но и с помощью использования тонкостенных фасадных элементов из бетона любой формы, которые подчеркивают архитектурную задумку автора или наоборот контрастируют с ней (рисунок 5.3).



Рисунок 5.2 – Здания с фасадами
из белого бетона

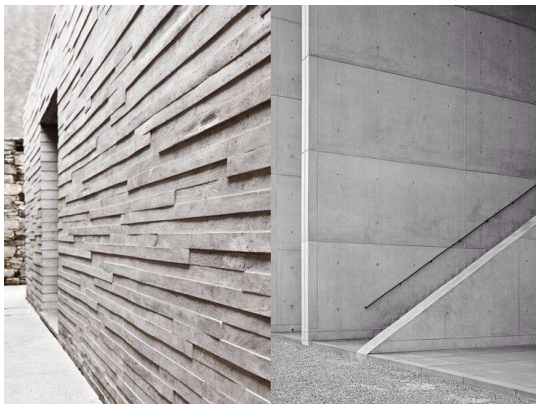


Рисунок 5.3 – Примеры разнообразия дизайнерских решений
для фасадов из бетона

Таким образом, архитектурным решением предлагается тонкостенная фасадная панель, использование которой должно происходить в экстерьерах на открытых пространствах с высоким доступом солнечных лучей. При этом, в предложенном архитектурном решении снижение скорости старения изделий будет обеспечено пониженными водопоглощением и пористостью поверхности разработанного бетона (за счет высокоплотной упаковки компонентов на микро- и макроуровнях). Форма изделия должна обеспечивать естественный слив (сток) воды с поверхности во время осадков для повышения эффективности процесса самоочищения.

5.2 Технология производства фасадных декоративных панелей из мелкозернистого бетона на основе белого цемента

Фасадные декоративные панели производят методом вибропрессования, вибролитья или пневмонабрызгом. Для придания декоративным панелям красивой, гладкой, сложной фактуры и сложных форм предпочтительнее метод вибролитья. Достоинствами данной технологии являются возможности получения любого вида лицевой поверхности, однородности цвета, высоких физико-механических показателей изделий.

Технология производства декоративных панелей из бетона на основе белого цемента с ВПП–Ан методом вибролитья не требует значительного технического перевооружения линии.

Полную технологическую схему производства декоративных панелей из бетона можно описать отдельными основными этапами:

1. Приемка и подготовка сырья.
2. Смешение сухих компонентов.
3. Изготовление бетонной смеси.
4. Вибролитье.
5. Тепловлажностная обработка.
6. Расформовка изделий.

7. Упаковка и хранение изделий.

Сырьевыми материалами для производства бетона являются: белый портландцемент, ВПП–Ан, микрокальцит, суперпластификатор Melflux 1641 F, заполнитель – отсев мраморный белый фракции 0–5,0 мм.

Получение ВПП–Ан происходит следующим образом (рисунок 5.4). В емкость (7) с помощью дозаторов (5, 6) поступает щавелевая кислота (2) и вода (3). В полученном 2 %-м растворе кислоты происходит выдерживание в течение 45 минут вспученного перлитового песка (1), поступившего через дозатор (4). Затем в емкость (8) поступает суспензия вспученного перлитового песка, где происходит промывание 0,05 %-ным раствором кислоты. Кислота (2) поступает через дозатор (5), а вода (3) поступает через дозатор (6).

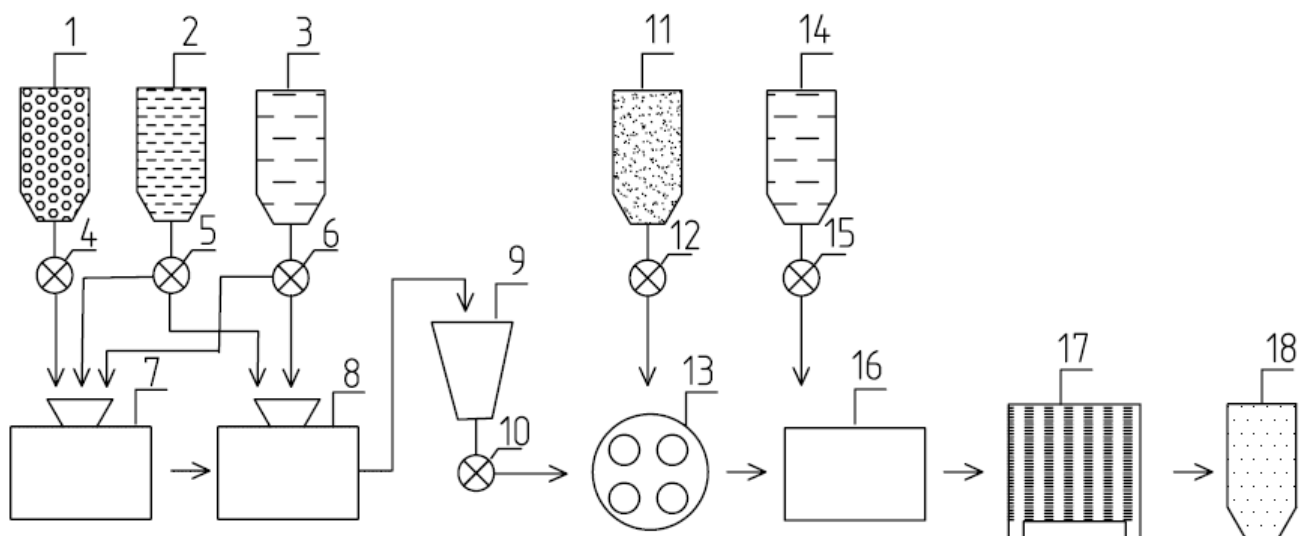


Рисунок 5.4 – Технологическая схема производства ВПП–Ан:

- 1, 2, 3 – расходные бункеры для хранения вспученного перлитового песка, щавелевой кислоты, воды; 4, 5, 6, 10, 12, 15 – дозаторы; 7, 8 – емкости для выдерживания и промывания; 9, 10, 14 – бункеры для влажного перлитового песка, анатаза и дистиллированной воды; 13 – планетарная мельница; 16 – емкость для промывания с ситом; 17 – сушильный шкаф; 18 – бункер для хранения ВПП–Ан

Выдержанная в кислоте и промытая разбавленным раствором кислоты суспензия направляется в бункер (9), откуда с помощью дозатора (10) поступает в планетарную мельницу (13) для совместного помола с анатазом, поступившим из бункера (11) с помощью дозатора (12). Полученный порошок промывается от остатков кислоты дистиллированной водой (14), поступающей через дозатор (15) в емкости с ситом (16). Далее происходит сушка в сушильном шкафу (17), и готовая добавка ВПП–Ан отправляется на хранение в герметичную емкость (18).

На рисунке 5.5 представлена технологическая схема получения фасадных декоративных панелей. На первом этапе происходит поступление сыпучих материалов (18–21) с помощью весовых дозаторов (24–27) в бетоносмеситель (31) для перемешивания в течение 1 минуты сухих компонентов.

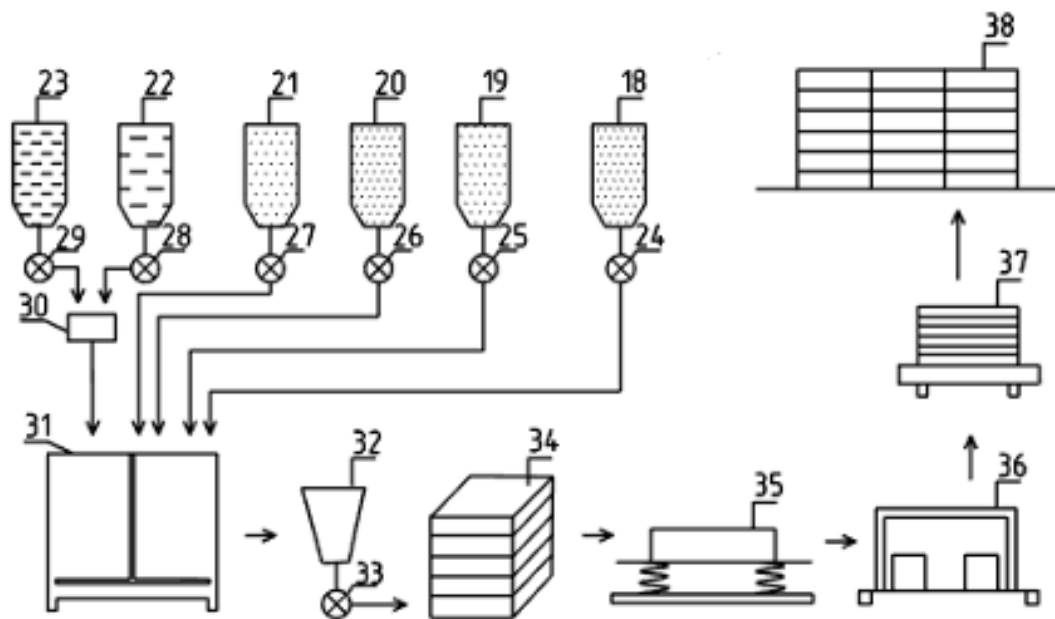


Рисунок 5.5 – Технологическая схема производства фасадных декоративных панелей из мелкозернистого бетона на основе белого цемента:

18–23 – расходные бункеры для хранения ВПП-Ан, цемента, микрокальцита, фракционированного мраморного отсева, ПАВ, воды; 24–29, 33 – дозаторы;

30 – смеситель; 31 – бетоносмеситель; 32 – бункер для бетонной смеси;

34 – формы для изделий; 35 – вибростол; 36 – камера ТВО;

37 – стол расформовочный; 38 – склад готовой продукции

На втором этапе происходит затворение водой (22) с суперпластификатором (23) из смесителя (30) сухих компонентов в бетоносмесителе (31) в течение 1 минуты.

Готовая бетонная смесь поступает в бункер (32), затем с помощью дозатора (33) направляется в формы (34) с дальнейшим уплотнением на вибростоле (35). Продолжительность вибрации – 1 минута, для получения плотного изделия без пустот.

Дозирование компонентов производится оборудованием без участия оператора.

Для уменьшения времени нахождения в обороте форм, а также для повышения эксплуатационных характеристик, декоративные изделия подвергаются ТВО (36). После ТВО происходит раформовка продукции на столе (37), с дальнейшим укладыванием изделий лицом к лицу на евро поддоны и обматыванием стрейч-пленкой для хранения на складе (38). Маркировка изделий происходит перед расформовкой: несмываемой краской наносится товарный знак, марка и дата изготовления. В зависимости от типа, фактуры лицевой поверхности, марки происходит размещение фасадных панелей с ВПП–Ан на складе.

Готовые изделия отпускают заказчику:

- в летнее время при достижении прочности не ниже 70 %;
- в зимнее время при 100 % проектной прочности.

5.3 Техничко-экономическое обоснование эффективности производства самоочищающегося мелкозернистого бетона на основе белого цемента

В работе были предложены составы мелкозернистого бетона на основе белого цемента с ВПП–Ан, которые рекомендованы для производства самоочищающихся тонкостенных изделий. Материальные затраты на производство ВПП–Ан складываются из стоимости используемых материалов (таблица 5.1). Применение фотокаталитических добавок влечет за собой удорожание себестоимости продукции, но это оправданные затраты, которые в

процессе эксплуатации окупаются за счет увеличения срока службы изделий, снижения затрат на периодическое техническое обслуживание фасадов зданий, которое заключается в необходимости проводить принудительную очистку поверхности от загрязнений, сведения к минимуму реставрационных работ.

Таблица 5.1 – Материальные затраты на производство 1 кг ВПП–Ан

Статья затрат	Стоимость 1 кг, руб	Расход материала на 1 кг добавки, кг	Цена, руб
Вспученный перлитовый песок	16,34	0,5	8,17
Наноразмерный анатаз	160	0,5	80
Щавелевая кислота ГОСТ 22180-76	100	0,025	2,5
Вода	0,015	18,5	0,27
ИТОГО			90,95

Для обоснования экономической целесообразности использования ВПП–Ан в качестве фотокаталитической добавки в производстве самоочищающихся тонкостенных изделий, был произведен расчет материальных затрат на 1 м³ бетона контрольного состава и разработанного (таблица 5.2). В качестве контрольного состава рассмотрен бетон, в котором в качестве вяжущего использован белый портландцемент, а в качестве фотокатализатора – наноразмерный анатаз.

На основании полученных данных, изменение материальных затрат на 1 м³ бетонной смеси разработанного и контрольного составов, составляет:

$$22\,653,15 - 20\,576,28 = 2076,87 \text{ рублей.}$$

$$\frac{2076,87}{22653,15} \cdot 100 \% = 9,17 \%$$

Таким образом, себестоимость 1 м³ бетонной смеси контрольного состава составила 22 653,15 рублей, что на 2076,87 рублей дороже, чем затраты на

получение 1 м³ разработанного состава, которые составили 20 576,28 рублей. На основании этого, экономия от использования бетонной смеси с ВПП–Ан для производства самоочищающихся тонкостенных изделий составила 9,17 % в сравнении с контрольным составом.

Таблица 5.2 – Материальные затраты на производство 1 м³ бетона

Статья затрат	Стоимость 1 кг, руб	Расход материала на 1 м ³ , кг	Цена, руб
Контрольный состав			
Белый портландцемент ПЦБ 1-500-Д0	21,38	535	11 438,30
Мраморный отсев	1,6	1392	2 227,20
Наноразмерный анатаз	160	53,5	8 560,00
Суперпластификатор Melflux 1641F	202,5	2,1	425,25
Вода	0,015	160	2,40
ИТОГО			22 653,15
Разработанный состав			
Белый портландцемент ПЦБ 1-500-Д0	21,38	321	6862,98
ВПП–Ан	90,95	107	9731,65
Микрокальцит	12,4	107	1326,8
Мраморный отсев	1,6	1392	2227,2
Суперпластификатор Melflux 1641F	202,5	2,1	425,25
Вода	0,015	160	2,4
ИТОГО			20 576,28

Эффективность предложенного решения складывается из экономической и

экологической составляющих. Применение тонкостенных изделий с фотокаталитическими свойствами снижает экологический прессинг за счет разложения загрязнений органического происхождения, попадающих на поверхность самоочищающихся изделий из окружающей среды. За счет этого увеличивается срок службы и сохраняется первоначальный внешний вид бетонных изделий. Экономическая эффективность производства тонкостенных изделий из бетона с использованием ВПП–Ан заключается в снижении расхода цемента на 40 % и повышении эффективности процессов самоочищения. Снижение расхода цемента также отвечает современным тенденциям сокращения объемов выбросов CO₂ при производстве материалов.

5.4 Финансовая поддержка и апробация диссертационного исследования

Работа выполнена при финансовой поддержке в форме гранта Российского научного фонда РНФ № 19-19-00263 «Физико-химические основы создания фотокаталитического композиционного материала и самоочищающихся цементных покрытий для конструкционных материалов строительного назначения» (2019–2021 гг.) и государственного задания Минобрнауки России проект № FZWN-2023-0006 «Научно-технические основы создания самоочищающихся структурно сопряженных покрытий строительных композитов» (2023–2025 гг.).

В рамках выполнения гранта РНФ была разработана технология получения полифункционального композиционного материала и исследованы его характеристики. В рамках выполнения государственного задания установлены закономерности влияния полифункционального композиционного материала на свойства цементной системы.

С целью внедрения результатов исследований разработаны следующие нормативно-технические документы:

- технологический регламент на производство полифункционального композиционного материала на основе вспученного перлитового песка

(Приложение Б);

– СТО 02066339-078-2024 «Самоочищающийся мелкозернистый бетон на основе белого портландцемента для тонкостенных изделий» (Приложение В);

– технологический регламент на изготовление самоочищающегося мелкозернистого бетона на основе белого портландцемента для тонкостенных изделий (Приложение Г).

Апробация разработанных составов проводилась в промышленных условиях на базе предприятий:

– ООО «Селена» (г. Шебекино) – при выпуске опытной партии ПКМ (Приложение Д);

– ООО «Мостдорстрой» (г. Белгород) – при выпуске опытной партии тонкостенных изделий (Приложение Е).

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлениям 08.03.01 Строительство и 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов; магистров по направлениям 08.04.01 Строительство и 28.04.03 Наноматериалы (Приложение Ж).

5.5 Выводы

1. Разработанный самоочищающийся мелкозернистый бетон имеет широкие перспективы применения в современном строительстве. Он рекомендован для создания тонкостенных изделий и малых архитектурных форм для использования в ландшафтном дизайне и отделке фасадов, при создании конструкций инфраструктуры. Его использование обеспечит эстетичность, функциональность и долговечность изделий, будет способствовать созданию экологически чистой городской среды. Особенно эффективно применение такого бетона будет в местах с высокой солнечной активностью и значительным уровнем загрязнения воздуха.

2. Предложена модернизация технологии производства фасадных декоративных панелей из мелкозернистого бетона на основе белого цемента за счет

внедрения модуля получения добавки ПКМ «ВПП-Ан», что не требует значительного технического перевооружения линии, может быть реализовано на действующих предприятиях и позволит получать самоочищающиеся изделия.

3. Технико-экономическая эффективность разработанных составов самоочищающегося мелкозернистого бетона на основе белого цемента для тонкостенных изделий обусловлена снижением расхода цемента, увеличением долговечности и устойчивости к внешним воздействиям, что сократит необходимость частого ремонта, замены, использования защитных материалов.

4. Апробация разработанных составов проводилась в промышленных условиях на базе предприятий ООО «Селена» (г. Шебекино) и ООО «Мостдорстрой» (г. Белгород). Для внедрения результатов исследований разработаны: технологический регламент на производство полифункционального композиционного материала; стандарт организации «Самоочищающийся мелкозернистый бетон на основе белого портландцемента для тонкостенных изделий»; технологический регламент на изготовление самоочищающегося мелкозернистого бетона на основе белого портландцемента для тонкостенных изделий. Теоретические и прикладные результаты внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлениям 08.03.01 Строительство и 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов; магистров по направлениям 08.04.01 Строительство и 28.04.03 Наноматериалы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Дополнены теоретические представления о способах получения эффективных полифункциональных добавок для цементных бетонов, объединяющих пуццоланическую и фотокаталитическую активность, о процессах фазо- и структурообразования цементных систем с комплексом добавок – вспученным перлитовым песком, анатазом и микрокальцитом. Доказана эффективность использования измельченного химически активированного ВПП в качестве носителя фотокатализатора.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение белого мелкозернистого бетона с высокими физико-механическими характеристиками для самоочищающихся тонкостенных изделий. Предварительная кислотная обработка и совместный помол с анатазом вспученного перлитового песка, выполняющего роль пуццоланового компонента и носителя фотокатализатора, позволяет повысить пуццоланическую (за счет увеличения удельной поверхности и механо-химической активации поверхности) и фотокаталитическую (за счет формирования связей Ti-O-Si) активность ПКМ системы «ВПП–Ан». Комплексное применение нано- (диоксид титана) и микроразмерных (микрокальцит) минеральных добавок в сочетании с пластификатором и мрамором в качестве заполнителя обеспечивает снижение капиллярной пористости, тем самым позволяя уменьшить проницаемость цементной матрицы при циркуляции влаги, что обеспечивает повышение атмосферостойкости тонкостенных изделий.

Выявлен характер влияния комплекса минеральных добавок на процессы фазо- и структурообразования белого портландцемента, в том числе: реологические параметры, кинетику тепловыделения, фазовый состав продуктов гидратации, микроструктуру, активность вяжущего. Совместное использование ПКМ системы «ВПП–Ан», полидисперсного микрокальцита и поликарбоксилатного пластификатора при замене 40 % белого цемента позволяет: снизить водопотребность на 15 % (по сравнению с использованием смеси ВПП и анатаза);

интенсифицировать процессы гидратации – смещение основного пика тепловыделения при гидратации на 27 мин. и повышение интенсивности тепловыделения на 21 %; снизить микропористость, повысить однородность и плотность цементного камня. Замена 40 % цемента на минеральный комплекс обеспечивает достижение активности (65,2 МПа) и прочности на сжатие после ТВО (48,2 МПа), сопоставимые с белым цементом без добавок (67,3 и 47,2 МПа, соответственно). Применение ПКМ «ВПП–Ан» позволяет увеличить фотокаталитическую активность вяжущего на 30 % в сравнении с образцом, полученным раздельным введением измельченного ВПП и анатаза.

Установлены закономерности влияния комплекса минеральных добавок, вводимых взамен части белого портландцемента, на свойства мелкозернистой бетонной смеси и затвердевшего бетона, его морфоструктурные особенности и способность к самоочищению, в том числе после моделирования атмосферных воздействий. Применение комплекса подходов к повышению плотности бетонной матрицы: использование нано- и микроразмерных минеральных добавок, реализация пуццолановой реакции, улучшение реологических параметров смеси введением пластификатора, оптимизация зернового состава заполнителя, обеспечивает получение самоочищающегося мелкозернистого бетона (фотокаталитическая активность не менее 67 %) с высокими декоративными и эксплуатационными характеристиками, в том числе устойчивостью к техногенным и биологическим загрязнениям в процессе эксплуатации белых тонкостенных изделий при циркуляции влаги.

Разработан способ модификации вспученного перлитового песка как носителя фотокаталитического агента в системе «ВПП–Ан» для использования в качестве полифункционального компонента вяжущего, заключающийся в выдерживании исходного ВПП в течение 45 минут в 2,0 %-ом водном растворе щавелевой кислоты с последующим промыванием 0,01 %-м раствором кислоты и совместным помолом с анатазом в соотношении 1:1 в планетарной мельнице, промыванием дистиллированной водой для удаления остатков кислоты и сушкой при 70 °С.

Разработаны составы мелкозернистого бетона на основе белого цемента, при его замене до 40 %, с классами прочности до В45, водопоглощением по массе не более 4 %, морозостойкостью до F300 для широкого спектра тонкостенных изделий, характеризующиеся устойчивостью к вымыванию водорастворимых соединений и фотокатализатора и способностью к самоочищению до 80 %.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть *рекомендованы* для внедрения на предприятиях по производству лицевого бетона, предназначенных для эксплуатации вне помещений, а также использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Строительство» и «Материаловедение и технологии материалов».

Перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в направлении расширения спектра минеральных добавок для белого цемента, а также фотокатализаторов, в том числе чувствительных к видимому свету, с целью снижения стоимости бетона для лицевых поверхностей и тонкостенных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Новикова, В.М.* Проблемы видеоэкологии городской среды / В.М. Новикова, С.В. Повышева // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – Т. 4. – № 1 (15). – С. 199-202.
2. *Шаймарданова, К.А.* К вопросу о влиянии визуальной среды города на состояние человека / К.А. Шаймарданова // Известия КазГАСУ. – 2020. – № 2 (52). – С. 160-167.
3. *Филин, В.А.* Визуальная среда города / В.А. Филин // Вестник международной академии наук (Русская секция). – 2006. – № 3 (23). – С. 43-50.
4. *Филин, В.А.* Видеоэкология. Что для глаза хорошо, а что плохо / В.А. Филин. – М.: Видеоэкология. – 2006. – 509 с.
5. *Кашкабаш, Т.В.* Интерпретация городского пространства в современных условиях / Т.В. Кашкабаш // Russian Journal of Education and Psychology. – 2012. – № 10 (18). – С. 388-399.
6. *Лапшина, Е.Г.* Динамическая архитектура в пространстве современного города / Е.Г. Лапшина, Я.И. Сухов // Региональная архитектура и строительство. – 2020. – № 2 (43). – С. 171-177.
7. *Вагнер, Е.А.* Формирование архитектурной среды пешеходных пространств в контексте сложившейся городской застройки / Е.А. Вагнер // Вестник евразийской науки. – 2016. – № 1 (8). – С. 123-140.
8. *Поляков, Е.Н.* Бионические аспекты в творчестве С. Калатравы / Е.Н. Поляков, Т.В. Дончук // Архитектон: известия вузов. – 2017. – № 57. – С. 1-3.
9. *Логвинов, В.Г.* От «зеленого строительства» к природоинтегрированной архитектуре. Принцип использования природных форм / В.Г. Логвинов // Проект Байкал. – 2016. – № 49. – С. 156-163.
10. *Воскресенская, А.И.* Колористическая организация открытых пространств как средство создания визуальной комфортной городской среды / А.И. Воскресенская // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2015. – № 5. – С. 66-70.

11. *Прошунина, К.А.* Теоретическая взаимосвязь эргономических принципов и концептуальной архитектуры жилого пространства / К.А. Прошунина, И.А. Овчеренко // Инженерно–строительный вестник Прикаспия. – 2018. – № 4 (26). – С. 12-23.
12. *Ожегова, Е.С.* Дизайн благоустройства. Сценарии проектирования комфортной среды / Е.С. Ожегова // АМІТ. – 2020. – № 2 (51). – С. 340-350.
13. *Забельшанский, Г.Б.* Архитектура и эмоциональный мир / Г.Б. Забельшанский, Г.Б. Миневрин, А.Г. Раппорт. – М.: Стройиздат, 1985. – 208 с.
14. *Сомов, Г.Ю.* Форма в архитектуре: Проблема теории и методологии / Г.Ю. Сомов, А.Г. Раппорт. – М.: Стройиздат, 1990. – 304 с.
15. *Николаевская, З.А.* Садово-парковый ландшафт / З.А. Николаевская. – М.: Стройиздат, 1989. – 344 с.
16. *Желев, Н.А.* Цементные композиты с микродисперсной добавкой / Н.А. Желев, В.Б. Петропавловская, Т.Б. Новиченкова // Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов: Сборник научных трудов. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2020. – С. 83-88.
17. *Белов, В.В.* Проектирование и практические способы оптимизации составов минеральных вяжущих систем / В.В. Белов, И.В. Образцов, М.А. Смирнов // Цемент и его применение. – 2011. – № 6. – С. 107-111.
18. *Чернышев, Е.М.* Высокотехнологичные высокопрочные бетоны: вопросы управления их структурой / Е.М. Чернышев, Д.Н. Коротких // Материалы международного конгресса «Наука и инновации в строительстве SIB–2008», Т. 1: Современные проблемы строительного материаловедения и технологии. – 2008. – С. 616-620.
19. *Лесовик, В.С.* К проблеме повышения эффективности эксплуатационных характеристик бетонов / В.С. Лесовик, Л.Л. Аксенова // Международная научно–практическая конференция «Инновационные материалы и технологии». – 2011. – С. 122-124.

20. *Зверев, В.М.* Бетоны для изделий малых архитектурных форм / В.М. Зверев, Б.Н. Мельников, М.С. Шерстюков // Журнал труды псковского политехнического института. – 2011. – № 14.2. – С. 117-121.
21. *Карпова, Д.А.* Определение водоредуцирующего эффекта суперпластификатора Melflux 1641F / Д.А. Карпова, Т.Б. Новиченкова, В.Б. Петропавловская // Направления развития Российской науки: теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов: Материалы Всероссийской научно–практической конференции. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2021. – С. 22-28.
22. *Лесовик, В.Р.* Высокопрочный мелкозернистый бетон на композиционных вяжущих и техногенных песках для монолитного строительства / Р.В. Лесовик, Е.С. Глаголев, Д.М. Сопин, М.С. Агеева. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. – 106 с.
23. *Кривобородов, Ю.Р.* Применение вторичных ресурсов для получения цементов / Ю.Р. Кривобородов, А.Ю. Бурлов, И.Ю. Бурлов // Строительные материалы. – 2009. – № 2. – С. 44-45.
24. *Белов, В.В.* Композиционный состав прессованного мелкозернистого бетона / В.В. Белов // Вестник Тверского государственного технического университета. – 2005. – № 6. – С. 11-15.
25. *Белов, В.В.* Формирование структуры и свойств прессованного мелкозернистого бетона / В.В. Белов // Саморазвивающаяся среда технического университета: Материалы Всероссийской научно–практической конференции/ Под редакцией Е.А. Евстифеевой, С.В. Рассадина. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2017. – С. 185-190.
26. *Белов, В.В.* Пути повышения эффективности мелкозернистых карбонатных бетонов / В.В. Белов, П.В. Куляев // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: Материалы Пятнадцатой Международной научно–технической конференции/ Редколлегия: В.Т. Ерофеев. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2017. – С. 134-137.

27. *Строкова, В.В.* Самоуплотняющийся бетон: преимущества и перспективы применения в строительстве / В.В. Строкова, А.О. Молчанов, В.В. Нелубова // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. – 2015. – № 5. – С. 164-167.
28. *Stroкова, V.V.* Resistance of cement stone in sanitation solutions / V.V. Stroкова, V.V. Nelubova, M.D. Rykunova // Magazine of Civil Engineering. – 2019. – Vol. 6 (90). – P. 72-84.
29. *Строкова, В.В.* Композиционное вяжущее для монолитного строительства в северных регионах / В.В. Строкова, В.В. Нелубова, Л.Н. Бодман, Ю.Н. Огурцова, Е.Н. Хахалева // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 11. – С. 36-42.
30. *Страхов, А.В.* Композиционные материалы на основе местного природного и техногенного сырья / А.В. Страхов, М.М. Иняхин // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона: Сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно–практической конференции. – Саратов, 2011. – С. 121-126.
31. *Бондарев, Б.А.* Композиционные строительные материалы на основе местных песков и отходов / Б.А. Бондарев, К.А. Корнев, А.Н. Ивашкин // Вестник ВолгГАСУ. Строительство и архитектура. – 2012. – № 26. – С. 96-101.
32. *Белов, В.В.* Получение вяжущего на основе глиносодержащих минералов / В.В. Белов, С.В. Пунегов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО–2021: Сборник трудов IV Международного научно–технического форума – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина, 2021. – С. 146-149.
33. *Гальмутдинов, Т.З.* Исследование процесса карбонизации мелкозернистого бетона / Т.З. Гальмутдинов, А.Р. Насибуллина, П.А. Федоров, В.М. Лапытов // Сборник материалов конференции. Научно–техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет 2011. – С. 129.

34. *Баженова, С.И.* Бетон высокой эксплуатационной надежности / С.И. Баженова // Технология бетонов. – 2011. – №9–10. – С. 14-15.
35. *Груздев, А.А.* Мелкозернистый бетон с повышенными эксплуатационными свойствами при армировании минерально–абразивными шламами / А.А. Груздеев, Т.К. Акчурин, О.Ю. Пушкарская // Материалы VI Международной научно–практической конференции «Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов». – Волгоград, 2011. – С. 132-137.
36. *Александрова, О.В.* Влияние кварцевого порошка и минеральных добавок на свойства высокопрочных бетонов / О.В. Александрова, Д.В.К. Нгуен, Б.И. Булгаков, В.Б. Петропавловская // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2020. – № 3. – С. 7-15.
37. *Баранов, Е.В.* Модифицированный декоративный мелкозернистый бетон с добавкой пластификатором и наполнителем / Е.В. Баранов, Т.И. Шелковникова, Т.М. Хорунжий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 4. – С. 13-19.
38. *Щеткова, Е.А.* Исследование свойств модифицированного мелкозернистого декоративного бетона / Е.А. Щеткова, Г.Г. Кашеварова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 3 (27). – С. 143-151.
39. *Мороз, М.Н.* Классификационные критерии формирования поверхности архитектурно–декоративных бетонов / М.Н. Мороз, В.И. Калашников, О.В. Суздальцев // Современные научные исследования и инновации. – 2016. – № 10 (66). – С. 114-117.
40. *Мейрамов, Д.Д.* Изготовление архитектурных деталей из декоративных бетонов / Д.Д. Мейрамов // Жилищное строительство. – 2005. – № 11. – С. 16-17.
41. *Калашников, В.И.* Техничко-экономическая эффективность внедрения архитектурно–декоративных порошково–активированных карбонатных песчаных

бетонов / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 6 (690). – С. 39-46.

42. *Гончарова, М.А.* Оценка качества лицевой поверхности изделий из многокомпонентных декоративных бетонов / М.А. Гончарова, А.Н. Ивашкин, О.А. Каширская // Жилищное строительство. – 2014. – № 12. – С. 19-22.

43. *Сулейманова, Л.А.* Светящиеся декоративные бетоны с использованием отходов камнедробления горных пород / Л.А. Сулейманова, М.В. Малюкова, И.С. Рябчевский, А.А. Корякина, Д.Э. Левшина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 12. – С. 8-16.

44. Пат. 2452702 РФ, Вяжущее и способ его приготовления для производства декоративного бетона / Сенкус В.В., Коробейников А.П., Стефанюк Б.М., Конакова Н.И., Карпова А.И., Барыльников В.В., Пискаленко В.В.; заявл. 01.10.2010; опубл. 10.06.2012.

45. *Mansour, G.* Self-compacting architectural concrete production using red mud / G. Mansour, Sh. Elyas Asadi, A. Khodabakhshian, F. Sourmeh, J. de Brito // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 226. – P. 418-427.

46. *Tamayo-García, B.* Mechanical Characterization of a New Architectural Concrete with Glass-Recycled Aggregate / B. Tamayo-García, A. Albareda Valls, A. Rivera-Rogel, C. Cornado // Buildings. – 2019. – Vol. 9(6). – P. 1-11.

47. Пат. 2245784 РФ, Способ изготовления декоративных фасадных изделий из архитектурного бетона и форма для его осуществления / Звездов А.И., Фаликман В.Р., Сорокин Ю.В., Денискин В.В.; заявл. 04.03.2003; опубл. 10.02.2005.

48. Пат. 2476312 РФ, Способ изготовления изделий из цветного архитектурного бетона и изделие, полученное этим способом / Щербин Н.Н., Боблак А.А., Малюкова М.В.; заявл. 27.09.2011; опубл. 27.02.2013.

49. *Cassar, L.* White cement for architectural concrete, possessing photocatalytic properties / L. Cassar, C. Pepe, G. Tognon, G. Guerrini, R. Amadelli // 11th Int. Congr. on the Chemistry of Cement. – 2003. – P. 1-11.

50. *Dantas, S.* Photocatalytic Performance of White Cement Mortars Exposed in Urban Atmosphere / S. Dantas, F. Vittorino // Global Journal of Researches in Engineering. – 2019. – №19(2). – P. 1-13.
51. *Hamad, B.* Investigations of chemical and physical properties of white cement concrete / B. Hamad // Advanced cement base materials. – 2000. – Vol.2(4). – P. 161-167.
52. *Temiz, H.* Mechanical Behavior of White Concrete / H. Temiz, M. Kose, H. Murat Genc // TEM Journal. – 2013. – Vol. 2. – P. 73-79.
53. *Dias, N.* Design and Characterization of White Self-Compacting Concrete / N. Dias, E. Júlio, J. Lourenço, M. da Silva // Conference: XXXI IAHS World Congress At: Montreal, Canada. – 2003. – P. 1-7.
54. *Грызлов, В.С.* Использование отходов производства при изготовлении цветных бетонов / В.С. Грызлов, А.И. Фоменко // Строительные материалы. – 2004. – № 12. – С. 36-37.
55. *Лукашевич, О.Д.* Получение цветного бетона с использованием пигментов из железосодержащих шламов водоподготовки / О.Д. Лукашевич // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 5 (52). – С. 127-137.
56. *Ди Марино, М.* Сверхвысокопрочный бетон нового поколения Aalborgextreme на основе белого цемента / М. Ди Марино, Э.П. Нильсен, Ч.Ц. Би // Цемент и его применение. – 2019. – № 4. – С. 96-101.
57. *Кузьмина, В.П.* Цветные цементы / В.П. Кузьмина // Технологии бетонов. – 2020. – №9–10. – С. 57-66.
58. *Кузьмина, В.П.* Механоактивированные цветные цементы / В.П. Кузьмина // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С. 25-27.
59. *Кузьмина, В.П.* Применение пигментов и цветных цементов в технологии производства сухих декоративных строительных смесей / В.П. Кузьмина // Строительные материалы. – 2000. – № 5. – С. 15-17.

60. Пат. 2168474 РФ, Способ получения цветных цементов / Дугуев С.В., Иванова В.Б., Придачин К.А., Сулименко Л.М.; заявл. 12.10.2000; опубл. 10.06.2001.
61. *Hospodarova, V. Color Pigments In Concrete And Their Properties / V. Hospodarova, J. Junak, N. Stevulova // Pollack Periodica. – 2015. – Vol.10(3). – P. 143-151.*
62. *Баженова, О.Ю. Мелкозернистые бетоны для архитектурных деталей и малых форм / О.Ю. Баженова, А.А. Фетисова, О.А. Щербенёва // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 7. – С. 144-147.*
63. *Баранова, А.А. Мелкодисперсный бетон для производства малых архитектурных форм / А.А. Баранова, А.А. Боброва, К.Н. Рудых // Современные технологии и научно–технический прогресс. – 2017. – Т. 1. – С. 108-109.*
64. *Лесовик, Р.В. Мелкозернистые бетоны для малых архитектурных форм / Р.В. Лесовик, М.С. Агеева, В.Г. Голиков, Ю.В. Фоменко // Строительные материалы. – 2005. – № 11. – С. 66-68.*
65. *Лесовик, В.С. Вяжущие для малых архитектурных форм из самоуплотняющихся бетонов / В.С. Лесовик, Ю.В. Дегтев, В.В. Воронов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2014. – № 5. – С. 85-89.*
66. Пат. 2217304 РФ, Способ изготовления архитектурно-строительных тел вращения из бетона / Автономов И.В., Ришес А.В., Зайцев А.Г., Молоков С.М., Свиридов В.Л., Меселов В.И.; заявл. 18.05.2002; опубл. 27.11.2003.
67. *Голова, Т.А. Исследование свойств композиционных материалов на основе фосфогипса / Т.А. Голова, И.А. Магеррамова, А.Р. Давтян // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2017. – Т. 17. – № 12. – С. 77-79.*
68. *Gots, V. Influence of whitening additives on the properties of decorative slag–alkaline cements / V. Gots, A. Gelevera, O. Petropavlovsky, N. Rogozina, V. Smeshko // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 907. – Article № 012033.*

69. *Осокин, А.П.* Бетоны на специальных цементах / А.П. Осокин, З.Б. Энтин, Л.А. Феднер, С.Н. Ефимов, А.Б. Самохвалов // *Строительные материалы*. – 2001. – № 9. – С. 9-12.
70. *Калашников, В.И.* Морозостойкость окрашенных архитектурно–декоративных порошково-активированных песчаных бетонов / В.И. Калашников, О.В. Суздальцев, М.Н. Мороз, В.В. Пауск // *Строительные материалы*. – 2015. – № 3. – С. 16-19.
71. Пат. 2559269 РФ, Наномодифицированный бетон и способ его получения / Прудков Е.Н., Гордеева А.Н., Закуражнов М.С.; заявл. 11.12.2013; опубл. 10.08.2015.
72. *Ashteyata, A.* Case study on production of self compacting concrete using white cement by pass dust / A. Ashteyata, R. Haddadb, Y. Obaidatb // *Case Studies in Construction Materials*. – 2018. – Vol. 9. – P. 1-11.
73. *Lübeck, A.* Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag / A. Lübeck, A. Gastaldini, D. Barin, H. Siqueira // *Cement & Concrete Composites*. – 2012. – Vol.34. – P. 392-399.
74. *Голова, Т.А.* Исследование композиционных вяжущих на основе фосфогипса для производства малых архитектурных форм / Т.А. Голова, А.Р. Давтян // *Вестник Кыргызско-Российского университета*. – 2016. – Т.16. – С. 97-100.
75. *Sahmenkoa, G.* The Use of High Performance Cement Composite in Renovation and Restoration of Architectural Elements of Buildings Facades / G. Sahmenkoa, S. Aispursb, A. Krasnikovsa // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 117. – P. 317-324.
76. *Строкова, В.В.* Малые архитектурные формы: состав и свойства бетонов для их получения / В.В. Строкова, Н.О. Хмара, В.В. Нелюбова, Н.А. Шаповалов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2021. – № 11. – С. 8-31.
77. *Балыков, А.С.* Кремниевые породы как модификаторы структуры фотокаталитических самоочищающихся бетонов. Оценка влияния на фазовый состав цементного камня / А.С. Балыков, Т.А. Низина, В.М. Кяшкин, Д.Б. Чугунов

// Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2024. – Т. 16 – № 2. – С. 158-169.

78. *Володин, В.В.* Гидратация цементных вяжущих с минеральными добавками на основе глинистых и карбонатных пород / В.В. Володин, О.В. Тараканов, Т.А. Низина, В.М. Кяшкин, А.С. Балыков // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19. – № 8. – С. 1317-1327.

79. *Лукутцова, Н.П.* Моделирование состава мелкозернистого бетона с золошлаковой смесью и суперпластификатором / Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин, Е.Ю. Горностаева, С.Н. Головин, Н.В. Золотухина // Вестник ВСГУТУ. – 2022. – № 2(85). – С. 71-77.

80. *Лукутцова, Н.П.* Эффективность суперпластификаторов в мелкозернистом бетоне с золошлаковой смесью / Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин, С.Н. Головин, А.В. Дудник, Н.В. Золотухина // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 8. – С. 29-38.

81. *Загороднюк, Л.Х.* Повышение эффективности производства сухих строительных смесей с учетом характеристик базовой поверхности : диссертация ... доктора технических наук : 05.23.05 / Загороднюк Лилия Хасановна; [Место защиты: Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова]. – Белгород, 2014. – 661 с.

82. *Лесовик, В.С.* Использование природного перлита в составе смешанных цементов / В.С. Лесовик, Ф.Е. Жерновой, Е.С. Глаголев // Строительные материалы. – 2009. – № 6. – С. 84-87.

83. *Козлова, В.И.* Варианты введения тонкодисперсной добавки на основе перлита в цементные композиции / В.И. Козлова, О.В. Земскова, Н.А. Леканов // Строительные материалы. – 2022. – № 11. – С. 42-49.

84. *Bakhshi, M.* Energy dissipation capacity of an optimized structural lightweight perlite concrete / M. Bakhshi, A. Dalalbashi, H. Soheili // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 389. – Article № 131765.

85. *Yan, Y.* The influence of expanded perlite as a bio-carrier on the freeze-thaw properties of self-healing concrete / Y. Yan, G. Jia, Y. Zhang, Y. Gao, Z. Li. // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 409. – Article № 133891.
86. *Орешкин, Д.В.* Утилизация отходов мрамора и бурового шлама в процессе производства строительных материалов / Д.В. Орешкин, И.В. Шадрунова, Т.В. Чекушина, А.Н. Прошляков // *Строительные материалы*. – 2019. – № 4. – С. 65-72.
87. *Василенко, О.Н.* Влияние отходов распиловки мрамора на технические характеристики цемента / О.Н. Василенко, В.О. Радченко // *Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов: Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции*. – Санкт-Петербург: Печатный цех, 2023. – С. 360-365.
88. *Бобир, С.Ю.* Основные факторы биологической колонизации скульптурных памятников на открытом воздухе в историческом центре Санкт-Петербурга / С.Ю. Бобир // *Экология урбанизированных территорий*. – 2023. – № 3. – С. 42-48.
89. *Шайхлисламова, Ю.А.* Эксперимент по разрушению различных типов природного камня в неорганических кислотах / Ю.А. Шайхлисламова // *Молодой ученый*. – 2020. – № 21(311). – С. 555-559.
90. *Сазанова, К.В.* Метаболитный профиль микромицета *Lecanicillium gracile*, выделенного из штукатурки и белого камня / К.В. Сазанова, В.Б. Понизовская // *Микология и фитопатология*. – 2022. – Т. 56. – № 5. – С. 357-365.
91. *Строкова, В.В.* Влияние состава и дисперсности заполнителя на его цементацию при карбонатной биоминерализации / В.В. Строка, У.Н. Духанина, Д.А. Балицкий, О.И. Дроздов, В.В. Нелюбова, О.В. Франк-Каменецкая, Д.Ю. Власов // *Строительные материалы*. – 2022. – № 7. – С. 63-70.
92. *Калинин, А.В.* Подбор состава архитектурного бетона, имитирующего натуральный камень / А.В. Калинин, О.А. Зябнева // *Инновационные технологии в электронике и приборостроении: Сборник докладов Российской научно-*

технической конференции с международным участием. Т.2. – Москва: МИРЭА – Российский технологический университет, 2021. – С. 477-479.

93. *Калашникова, Е.И.* Имитация натурального камня для художественной отделки помещений / Е.И. Калашникова, К.С. Пономарева // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2019. – № 4. – С. 312-319.

94. *Еличев, К.А.* Экспериментальная оценка свойств горных пород с целью возможности их использования декоративных бетонных блоков / К.А. Еличев, М.О. Сергеев // Инженерный вестник Дона. – 2019. – №1. – Статья № 5631.

95. *Нурымбетов, Б.Ч.* Влияние наполнителя на процессе структурообразования в известково-белитовых вяжущих / Б.Ч. Нурымбетов, А.М. Кудайбергенова // Материалы докладов 52-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, Т. 1. – Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2019. – С. 312-314.

96. *Фаликман, В.Р.* Новые эффективные высокофункциональные бетоны / В.Р. Фаликман // Бетон и железобетон. – 2011. – № 2. – С. 78-84.

97. *Калашников, В.И.* Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2008. – № 10. – С. 4-6

98. *Архипенко, А.В.* Влияние на эффективность действия пластифицирующих добавок мелкого заполнителя / А.В. Архипенко, А.А. Микушин, С.Н. Рябов, Р.Г. Шишова // Образование, наука и технологии: основные проблемы и направления развития: Сборник научных трудов по материалам Международной научно–практической конференции – Москва: Индивидуальный предприниматель Туголуков Александр Валерьевич, 2022. – С. 123-129.

99. *Балыков, А.С.* Критерии эффективности цементных бетонов и их применение для анализа составов высокопрочных композитов / А.С. Балыков, Т.А. Низина, Л.В. Макарова // Строительные материалы. – 2017. – № 6. – С. 69-75.

100. *Демьяненко, О.В.* Эффективность применения микрокальцита в производстве цементных композиций на цементной основе / О.В. Демьяненко, А.А.

Куликова // Избранные доклады IV Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы» (МНТ–2017). – 2017. – С. 39-41.

101. *Куликова, А.А.* Комплексные модифицирующие добавки для строительных смесей на цементной основе / А.А. Куликова, О.В. Демьяненко, Е.А. Сорокина, Н.О. Копаница // Вестник Томского государственного архитектурно–строительного университета. – 2019. – Т. 21. – № 6. – С. 140.

102. *Жилкина, А.Д.* Изучение влияния состава минерального вяжущего на его прочность на ранней стадии твердения / А.Д. Жилкина, Б.М. Лозовский, С.В. Макаренко // Евразийский научный журнал. – 2019. – № 6. – С. 25-28.

103. *Еличев, К.А.* Методика подбора состава компонентов для изготовления декоративных плит / К.А. Еличев, Э.М. Пинт // Форум молодых ученых. – 2018. – № 6/1(22). – С. 1106-1111.

104. *Сулейманова, Л.А.* Светящиеся декоративные бетоны с использованием отходов камнедробления горных пород / Л.А. Сулейманова, М.В. Малюкова, И.С. Рябчевский, А.А. Корякина, Д.Э. Левшина // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 12. – С. 8-16.

105. *Рахимбаев, Ш.М.* Влияние электроповерхностных свойств минерального наполнителя на морозостойкость порошковых бетонов / Ш.М. Рахимбаев, Н.М. Толыпина, А.А. Косинова, Е.Н. Хахалева // Строительные материалы. – 2019. – № 10. – С. 12-15.

106. *Корчунов, И.В.* Использование известняка при разработке составов добавочных цементов повышенной морозостойкости / И.В. Корчунов, Е.Н. Потапова, С.П. Сивков, Е.А. Волошин, С.А. Лукошкин // Цемент и его применение. – 2022. – № 2. – С. 44-49.

107. Обзор отечественного и зарубежного опыта разработки строительных материалов с фотокаталитическим эффектом / Д.Р. Низин, Т.А. Низина, Я.А. Орлова, И.П. Спирин // Огарёв–Online. – 2023. – № 7(192).

108. *Кийко, П.И.* Факторы, влияющие на эффективность самоочищения строительных материалов с фотокаталитически активными компонентами / П.И. Кийко, Т.Н. Черных, В.П. Плесовских // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 5. – С. 778-788.
109. *Кийко, П.И.* Влияние железосодержащих компонентов в фасадных покрытиях на их способность к самоочищению / П.И. Кийко, Т.Н. Черных // Цемент и его применение. – 2024. – № 1. – С. 60-63.
110. *Черных, Т.Н.* Анатаз-кремнеземистая добавка для самоочищающихся цементных строительных материалов / Т.Н. Черных, П.И. Кийко, М.В. Криушин // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2025. – Т. 17. – № 1. – С. 5-13.
111. *Антоненко, М.В.* Мелкозернистый бетон с полифункциональной анатаз–кремнеземной добавкой для самоочищающихся изделий: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / М.В. Антоненко. – 2022. – 200 с.
112. *Строкова, В.В.* Золь-гель синтез фотокаталитических композиционных материалов / В.В. Строкова, Е.Н. Губарева, Ю.Н. Огурцова, С.В. Неровная, М.В. Антоненко. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – 134 с.
113. *Строкова, В.В.* Влияние активации фибры на свойства поверхности фотокаталитического композиционного материала на ее основе / В.В. Строкова, С.В. Неровная, Ю.Н. Огурцова, Е.Н. Губарева // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2024. – Т. 16. – № 4. – С. 329-341.
114. ГОСТ 22180-76 Реактивы. Кислота щавелевая. Технические условия. – Введ. 01.07.77. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 2004. – 11 с.
115. ГОСТ 965-89 Портландцементы белые. Технические условия. – Введ. 01.07.90. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 2004. – 10 с.
116. ГОСТ 22856-89 Щебень и песок декоративные из природного камня. Технические условия. – Введ. 01.01.1990. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 1990. – 11 с.

117. ГОСТ 23732–2011 Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. – Введ. 01.07.2012. – М.: Стандартинформ. – 2012. – 16 с.
118. ГОСТ 24211–2008 Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. – Введ. 01.07.2009. – М.: Стандартинформ. – 2010. – 17 с.
119. Пат. 2471188 РФ, Способ испытания строительных материалов на биостойкость / Строганов В.Ф., Куколева Д.А.; заявл. 21.10.2011; опубл. 27.12.2012.
120. ГОСТ 9.048–89 Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов. – Введ. 01.07.1991. – М.: Издательство стандартов. – 1989. – 23 с.
121. UNI 11259–2016 Building materials. Test methods for the evaluation of photocatalytic activity. – Milan: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2016. – 20 p.
122. ГОСТ Р 57255–2016 Бетоны фотокаталитически активные самоочищающиеся. Технические условия. – Введ. 01.07.2017. – М.: Стандартинформ. – 2016. – 20 с.
123. ГОСТ Р 56593–2015 Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Методы испытаний. – Введ. 01.07.2016. – М.: Стандартинформ. – 2016. – 11 с.
124. ГОСТ 25094–2015 Добавки активные минеральные для цемента. Метод определения активности. – Введ. 01.07.2016. – М.: Стандартинформ. – 2016. – 8 с.
125. *Нечипоренко, А.П.* Донорно–акцепторные свойства поверхности твердофазных систем. Индикаторный метод / А.П. Нечипоренко. – СПб.: Бэмби, 2017. – 284 с.
126. ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема. – Введ. 01.01.1978. – М.: Издательство стандартов. – 1976. – 8 с.

127. *Шахова, Л.Д.* К вопросу совместимости цемента с пластифицирующими добавками / Л.Д. Шахова // Цемент и его применение. – 2024. – № 4. – С. 48-55.
128. ГОСТ 30744-2001 Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. – Введ. 01.07.2002. – М.: МНТКС. – 2002. – 20 с.
129. ГОСТ 10181-2014 Смеси бетонные. Методы испытаний. – Введ. 01.07.2015. – М.: МНТКС. – 2014. – 28 с.
130. ГОСТ 10180–2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Введ. 01.07.2013. – М.: Стандартинформ. – 2018. – 36 с.
131. ГОСТ 12730.3–2020 Бетоны. Метод определения водопоглощения. – Введ. 01.07.2021. – М.: Стандартинформ. – 2021. – 7 с.
132. ГОСТ 12730.4–2020 Бетоны. Методы определения параметров пористости. – Введ. 01.07.2021. – М.: Стандартинформ. – 2021. – 13 с.
133. ГОСТ 10060–2012 Бетоны. Методы определения морозостойкости. – Введ. 01.07.2013. – М.: Стандартинформ. – 2014. – 19 с.
134. *Хмара, Н.О.* Показатели биологического сопротивления цементного камня с добавкой вспученного перлитового песка / Н.О. Хмара, Ю.Н. Огурцова, В.В. Строкова, В.В. Нелюбова, У.Н. Духанина // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 4(57). – С. 30-40.
135. ГОСТ 9.049-91 Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов. – Введ. 01.07.1992. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР. – 1991. – 15 с.
136. *Stroková, V.* Obtaining and properties of a photocatalytic composite material of the «SiO₂–TiO₂» system based on various types of silica raw materials / V. Stroková, E. Gubareva, Y. Ogurtsova, R. Fediuk; P. Zhao, N. Vatin, Y. Vasilev // Nanomaterials. – 2021. – Vol. 11(4). – Article № 866.
137. *Педро, Ж.* Экспериментальные исследования геохимического выветривания кристаллических пород / пер. М.В. Пастуховой под ред. А.Г.

Коссовской, «Науки о земле. Фундаментальные труды зарубежных ученых по геологии, геофизике и геохимии. – М.: Издательство «Мир», 1971. – 252 с.

138. *Огурцова, Ю.Н.* Мелкозернистый бетон с гидрофобизирующим гранулированным заполнителем: дис. ... канд. техн. наук. Спец. 05.23.05 / Огурцова Юлия Николаевна. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – 182 с.

139. *Черкасов, В.Д.* Структурообразование цементных композитов с добавкой модифицированного диатомита / В.Д. Черкасов, В.И. Бузулуков, О.В. Тараканов, А.И. Емельянов // Строительные материалы. – 2015. – № 11. – С. 75.

140. *Бутт, Ю.М.* Технология вяжущих веществ: учебник для вузов / Ю.М. Бутт, С.Д. Окорочков, М.М. Сычёв, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1965. – 619 с.

141. *Бутт, Ю.М.* Химическая технология вяжущих материалов: учебник для вузов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1980. – 472 с.

142. *Юнг, В.Н.* Технология вяжущих веществ / В.Н. Юнг, Ю.М. Бутт, В.Ф. Журавлев, С.Д. Окорочков. – Москва: Госиздат литературы по строительным материалам, 1952. – 608 с.

143. *Погорелов, В.А.* Влияние гранулометрического состава бетонной смеси на структурное преобразование бетонной прочности / В.А. Погорелов // Вестник МГСУ. – 2010. – №1. – С. 200-206.

144. *Ушеров–Маршак, А.В.* Совместимость – тема бетоноведения и ресурс технологии бетона / А.В. Ушеров–Маршак // Строительные материалы. – 2009. – № 10. – С. 12-15.

145. *Калашников, В.И.* Бетоны нового поколения и реологические матрицы / В.И. Калашников, С.В. Ананьев // Новые энерго- и ресурсосберегающие наукоёмкие технологии в производстве строительных материалов. – Пенза: Изд-во Приволжский Дом знаний, 2011. – №4. – С. 25-41.

146. *Леденев, А.А.* Повышение эффективности применения химических добавок для бетонов на основе поликарбоксилатов / А.А. Леденев, С.М. Усачев, В.Т. Перцев, О.Б. Рудаков // Строительные материалы. – 2017. – № 6. – С. 69-75.

147. *Tolstoy, A.D.* Improving New Generation Concretes (NGCs) by Introducing Technogenic Materials / A.D. Tolstoy, V.S. Lesovik, A.S. Milkina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2012. – Vol. 132. – Iss. 2. – P. 2398-2403.

148. *Баженова, О.Ю.* Особенности структуры декоративных бетонов / О.Ю. Баженова, С.И. Баженова // Успехи современной науки. – 2016. – № 6(3). – С. 21-23.

149. *Черепанова, И.А.* Окрашенные строительные композиты с использованием полифункционального минерального пигмента / И.А. Черепанова, В.И. Логанина, А.В. Щецов, М.И. Ломов // В сборнике: Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека. II Междунар. онлайн-конгресс, посвящённый 30-летию кафедры Строительного материаловедения, изделий и конструкций. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 762-766.

150. *Рябчевский, И.С.* Аналитический обзор декоративных бетонов и опыт их применения в современном строительстве / И.С. Рябчевский, Д.Э. Левшина // Наука и инновации в строительстве. Сборник докладов V Междунар. науч.-практ. конф. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 201-205.

151. *Калашников, В.И.* Терминология науки о бетоне нового поколения / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2011. – №3. – С.103–106.

152. *Мороз, М.Н.* Классификационные критерии формирования поверхности архитектурно-декоративных бетонов / М.Н. Мороз, В.И. Калашников, О.В. Суздальцев // Современные научные исследования и инновации. – 2016. – № 10 (66). – С. 114-117.

153. *Калашников, В.И.* Бетоны старого и нового поколений. Состояние и перспективы / В.И. Калашников // Наука: 21 век. – 2012. – №1. – С. 60-67.

154. *Логанина, В.И.* Обеспечение качества внешнего вида защитно-декоративных покрытий цементных бетонов / В.И. Логанина, Г.А. Фокин // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №3(40). – С. 68-72.

155. *Надиевский, С.Ю.* Перлит в современных бетонах, сухих строительных смесях и негорючих теплоизоляционных изделиях / С.Ю. Надиевский // Строительные материалы. – 2006. – № 6. – С. 78.
156. *Загороднюк, Л.Х.* Перлитовая пыль – эффективный наполнитель для сухих строительных смесей / Л.Х. Загороднюк, Н.В. Ширина // Строительные материалы. – 2007. – №5. – С. 44-45.
157. *Овчаренко, Е.Г.* Утеплители на основе вспученного перлита / Е.Г. Овчаренко // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2003. – № 2. – С. 18-19.
158. *Каменецкий, С.П.* Перлиты: свойства, технология и применение / С.П. Каменецкий. – М.: Стройиздат, 1963.
159. *Пащенко, А.А.* Гидрофобный вспученный перлит / А.А. Пащенко. – Киев: Наук.думка, 1977. – 193 с.
160. *Kaufhold, S.* Porosity and distribution of water in perlite from the island of Milos, Greece / S. Kaufhold, A. Reese, W. Schwiebacher, R. Dohrmann, G.H. Grathoff, L.N. Warr, M. Halisch, C. Müller, U. Schwarz-Schampera, K. Ufer // SpringerPlus. – 2014. – Vol. 3. – Article № 598.
161. *Огурцова, Ю.Н.* Особенности подготовки природного и техногенного минерального сырья для получения фотокаталитических композиционных материалов / Ю.Н. Огурцова, В.В. Строкова, С.В. Неровная, Е.Н. Губарева // Обогащение руд. – 2023. – № 5. – С. 44-50.
162. *Vyšvařil, M.* Non-hydrophobized perlite renders for repair and thermal insulation purposes: Influence of different binders on their properties and durability / M. Vyšvařil, M. Pavlíková, M. Záleská, P. Bayer, Z. Pavlík // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 263. – Article № 120617.
163. *Строкова, В.В.* Вспученный перлитовый песок как эффективная добавка к вяжущему / В.В. Строкова, В.В. Нелюбова, Н.О. Хмара, А.И. Буковцова, Ю.В. Денисова // Строительные материалы. – 2022. – № 6. – С. 61-66.

164. *Mokhtarimehr, M.* Super-hydrophilic property of vanadium doped TiO_2 – SiO_2 sol–gel derived thin film / M. Mokhtarimehr, M. Pakshir, A. Eshaghi, M. Hossien Shariat // *Thin Solid Films*. – 2013. – Vol. 532. – P. 123-126.
165. *Tsiourvas, D.* Covalent attachment of a bioactive hyperbranched polymeric layer to titanium surface for the biomimetic growth of calcium phosphates / D. Tsiourvas, A. Tsetsekou, M. Arkas, S. Diplas, E. Mastrogianni // *J Mater Sci: Mater Med*. – 2011. – Vol. 22. – P. 85-96.
166. *Lihitkar, N.B.* Titania nanoparticles synthesis in mesoporous molecular sieve MCM-41 / N.B. Lihitkar, Majid Kazemian Abyaneh, V. Samuel, R. Pasricha, S.W. Gosavi, S.K. Kulkarni // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2007. – Vol. 314. – P. 310-316.
167. *Ren, J.* Silica-Titania mixed Oxides: Si–O–Ti Connectivity, Coordination of Titanium, and Surface Acidic Properties / J. Ren, Z. Li, S. Liu, Y. Xing, K. Xie // *Catalysis Letters*. – 2008. – Vol. 124. – P. 185-194.
168. *Huang, C.* Synthesis of Neutral $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ Hydrosol and Its Application as Antireflective Self-Cleaning Thin Film / C. Huang, H. Bai, Y. Huang, S. Liu, S. Yen, Y. Tseng // *International Journal of Photoenergy*. – 2012. – Vol. 2012. – Article № 620764.
169. *Мурашкевич, А.Н.* Инфракрасные спектры поглощения и структура композитов TiO_2 – SiO_2 / А.Н. Мурашкевич, А.С. Лавицкая, Т.Н. Баранникова, И.М. Жарский // *Журнал Прикладной спектроскопии*. – 2008. – Т. 75. – №5. – С. 724-728.
170. *Седова, А.А.* Изучение процессов повреждения цементного камня растворами карбоновых кислот / А.А. Седова, В.М. Иванов, В.П. Селяев, Р.А. Полянсков, А.К. Осипов, Л.И. Куприяшкина // *Вестник Московского Университета. Серия 2: Химия*. – 2014. – Т. 55. – № 5. – С. 301-307.
171. Пат. 2348148 РФ, Субстрат для выращивания растений в защищенном грунте / Бахтин А.А.; заявл. 10.10.2007; опубл. 03.03.2009.
172. *Сютова, Е.А.* Влияние кислотно-основной активации на изменение свойств поверхности алюмосиликатов / Е.А. Сютова, Л.А. Джигола // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. – 2024. – Т. 67. – Вып. 2. – С. 52-58.

173. Пат. 2603686 РФ, Бетон с повышенной стойкостью к воздействию агрессивных сред и способ его модификации / Курбатов В.Л.; заявл. 03.04.2015; опубл. 27.11.2016.

174. *Kaufhold, S.* Porosity and distribution of water in perlite from the island of Milos, Greece / S. Kaufhold, A. Reese, W. Schwiebacher, R. Dohrmann, G.H. Grathoff, L.N. Warr, M. Halisch, C. Müller, U. Schwarz-Schampera, K. Ufer // SpringerPlus. – 2014. – Vol. 3. – Article № 598.

175. *Харитонов, А.М.* Применение добавки вспученного перлита для модификации свойств цементных композитов / А.М. Харитонов, А.С. Сидорова, Д.М. Андреев // Цемент и его применение. – 2023. – № 4. – С. 72-75.

176. *Aïtcin, P.-C.* Science and Technology of Concrete Admixtures / P.-C. Aïtcin, R.J. Flatt. – Woodhead Publishing, 2016. – 613 p.

177. *Самченко, С.В.* Свойства цементных композитов на основе известняка в зависимости от его гранулометрического состава / С.В. Самченко, О.В. Александрова, А.Ю. Гуркин // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15. – №7. – С. 999-1006.

178. *Балыков, А.С.* Исследование реотехнологических характеристик цементных и минеральных суспензий при разработке самоуплотняющихся бетонных смесей / А.С. Балыков, В.В. Володин, У.М. Гаджиева, Д.И. Коровкин, Т.А. Низина, Р.М. Смакаев // Огарёв-Online. – 2018. – № 9(114). – С. 3.

179. *Xu, K.* Influences of Additives on the Rheological Properties of Cement Composites: A Review of Material Impacts / K. Xu, J. Yang, H. He, J. Wei, Y. Zhu // Materials. – 2025. – Vol. 18. – P. 1753.

180. *Martins, J.R.* Rheological and stability analysis of cement pastes incorporating silica-based wastes / J.R. Martins, J. Cavalcante Rocha, D. Hotza, L. Senff // Particuology. – 2024. – Vol. 89. – P. 144-152.

181. *Тейлор, Х.* Химия цемента / Х. Тейлор. – М.: Мир, 1996. – 560 с.

182. *Воронов, В.В.* Особенности гидратации и твердения полиминеральных композиционных вяжущих для пенобетонов / В.В. Воронов, Е.С. Глаголев // Вестник СибАДИ. – 2020. – Т. 17. – № 1. – С. 122-135.

183. *Кузнецова, В.* Кинетика гидратации и свойства цемента с добавкой метаксаолина / В. Кузнецова, А.П. Нефедьев, Д.Ю. Коссов // Строительные материалы. – 2015. – № 7. – С. 3–4.
184. *Береговой, В.А.* Высокофункциональные бетоны для станкостроения с применением нано– и микромасштабных сырьевых компонентов / В.А. Береговой, Е.В. Снадин, А.С. Иноземцев, А.С. Пилипенко // Нанотехнологии в строительстве. – 2023. – Т. 15. – № 3. – С. 200-210.
185. *Stoyanov, V.* A Study of the Influence of Thermoactivated Natural Zeolite on the Hydration of White Cement Mortars / V. Stoyanov, V. Petkova, K. Mihaylova, M. Shopska // Materials. – 2024. – Vol. 17. – Article № 4798.
186. *Li, L.* Hydration kinetics and apparent activation energy of cement pastes containing high silica fume content at lower curing temperature / L. Li, W. Sun, Z. Feng, Y. Li, T. Feng, Z. Liu // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 435. – Article № 136881.
187. *Куликова, А.А.* Комплексные модифицирующие добавки для строительных смесей на цементной основе / А.А. Куликова, О.В. Демьяненко, Е.А. Сорокина, Н.О. Копаница // Вестник Томского государственного архитектурно–строительного университета. – 2019. – Т. 21. – № 6. – С. 140-148.
188. *Копаница, Н.О.* Комплексные добавки на основе вторичных ресурсов для модификации цементных композиций / Н.О. Копаница, О.В. Демьяненко, А.А. Куликова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 136-144.
189. *Zhao, D.* Hydration of cement pastes with calcium carbonate polymorphs / D. Zhao, J.M. Williams, Z. Li, A.-H. Alissa Park, A. Radlińska, P. Hou, S. Kawashima // Cement and Concrete Research. – 2023. – Vol. 173. – Article № 107270.
190. ГОСТ 27006–2019 Бетоны. Правила подбора состава. – Введ. 01.07.2020. – М.: Стандартинформ. – 2019. – 20 с.
191. Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов (к ГОСТ 27006). Методическое пособие. – Москва: АО НИЦ Строительство, 2016. – 100 с.

192. *Белов, В.В.* Оптимальные структуры сырьевых смесей при изготовлении строительных цементных композитов / В.В. Белов, И.В. Образцов // Бетон и железобетон. – 2021. – № 4(606). – С. 29-38.

193. *Образцов, И.В.* Оптимизация зерновых составов цементно-минеральных смесей для производства строительных композитов методами компьютерного моделирования: специальность 05.23.05 «Строительные материалы и изделия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Образцов Илья Вячеславович, 2014. – 131 с.

194. *Богданов, Р.Р.* Оптимизация фракционного состава смеси заполнителей для самоуплотняющегося бетона / Р.Р. Богданов, Р.А. Ибрагимов, Е.В. Королев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – № 4(50). – Р. 327-335.

195. *Yu, R.* Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC) / R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouzers // Cement and Concrete Research. – 2014. – Vol. 56. – P. 29-39.

196. *Куляев, П.В.* Роль оптимальной гранулометрии известняковой добавки с наноразмерными составляющими в производстве строительных композитов / П. В. Куляев, В. В. Белов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. – 2020. – № 3(7). – С. 25-31.

197. ГОСТ 31384–2017 Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования. – Введ. 01.03.2018. – М.: МНТКС. – 2017. – 49 с.

198. *Байрамуков, С.Х.* Концепция устойчивого строительства / С.Х. Байрамуков, З.Н. Долаева, А.У. Салпагарова // Инженерный Вестник Дона. – 2020. – №10 (70). – С. 330-336.

199. *Mircea, D.* Self-Cleaning Concrete for Landscaping Applications / D. Mircea // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 289. – Article № 05004.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Состав и свойства вяжущих и бетонов применяемых для тонкостенных изделий [76]

№ состав а п/п	Виды сырья для композиционного вяжущего	Состав композиционного вяжущего/ бетона	Контролируемые параметры и физико-механические свойства композиционного вяжущего / бетона	Номер публикации/Ссылка на источник
1. Состав и свойства мелкозернистых бетонов для производства тонкостенных изделий				
1.	ПЦ М500 Щуровский завод (белый) Кварцевый песок, фракции 0,2-0,4 мм (белый) трех видов с Мк = 1,5 (П1) Мк = 2,3 (П4) Мк = 1,84 (П5) Водоредуцирующая добавка на основе эфира полиарила MasterPolyHeed 3043	Бетон Соотношение ПЦ к П1 1:2 Содержание водоредуцирующей добавки, – %	Бетон В/Вяз = 0,6; Распływ конуса 177 мм Прочность на сжатие, через 28 сут. , Rсж28 = 31,5 МПа Прочность на изгиб, через 28 сут. Rиз28 = 7,1 МПа	1/[62]
2.		Соотношение ПЦ к П4 1:2 Содержание водоредуцирующей добавки, – %	В/Вяз = 0,5; Распływ конуса 178 мм Rсж28 = 27,6 МПа; Rиз28 = 8,0 МПа	
3.		Соотношение ПЦ к П5 1:2 Содержание водоредуцирующей добавки, – %	В/Вяз = 0,55; Распływ конуса 180 мм Rсж28 = 29,5 МПа; Rиз28 = 8,0 МПа	
4.		Соотношение ПЦ к П1 1:2 Содержание водоредуцирующей добавки 1 %	В/Вяз = 0,45; Распływ конуса 165 мм Rсж28 = 36,2 МПа; Rиз28 = 7,6 МПа	
5.		Соотношение ПЦ к П4 1:2 Содержание водоредуцирующей добавки 1 %	В/Вяз = 0,35; Распływ конуса 215 мм Rсж28 = 44,6 МПа; Rиз28 = 9,3 МПа*	
6.		Соотношение ПЦ к П5 1:2 Содержание водоредуцирующей добавки 1%	В/Вяз = 0,35; Распływ конуса 228 мм Rсж28 = 43,8 МПа; Rиз28 = 7,8 МПа	
7.		Соотношение ПЦ к П1 1:2 Содержание водоредуцирующей добавки 1,5 %	В/Вяз = 0,4; Распływ конуса 195 мм Rсж28 = 42,5 МПа; Rиз28 = 8,5 МПа	
8.		Соотношение ПЦ к П4 1:2 Содержание водоредуцирующей добавки 1,5 %	В/Вяз = 0,3; Распływ конуса 235 мм Rсж28 = 44,0 МПа; Rиз28 = 11,1 МПа	
9.		Соотношение ПЦ к П5 1:2 Содержание водоредуцирующей добавки 1,5%	В/Вяз = 0,3; Распływ конуса 240 мм Rсж28 = 56,6 МПа; Rиз28 = 11,0 МПа	
10.	Цемент марки ЦЕМ П/А-3 32,5Б (ПЦ400 Д20) АО «Ангарскемент» Микрокремнезем с фильтров пылоуловителей ЗАО «Кремний» (МК) Мел марки МТД-2 Белгородская область (М1) Мел марки CALCITECV/40S Италия (М2) Гиперпластификатор на основе поликарбоксилатов «МС-Power-Flow-3100» (ГП)	Бетон Расход материалов на 1 м³ бетона, % от массы сухих веществ ПЦ 400 Д20 – 30; МК – 70; В – 62,5; ГП – 0,002	Бетон Коэффициент конструктивного качества К.К.К. = Rсж/рсп. = 9,89	2/[63]
11.		ПЦ 400 Д20 – 40; МК – 60; В – 61,6; ГП – 0,002	К.К.К. = 14,97	
12.		ПЦ 400 Д20 – 50; МК – 50; В – 60,0; ГП – 0,002	К.К.К. = 15,15	
13.		ПЦ 400 Д20 – 30; МК – 65; В – 61,8; М1 – 5; ГП – 0,002	К.К.К. = 7,72	
14.		ПЦ 400 Д20 – 40; МК – 55; В – 60,8; М1 – 5; ГП – 0,002	К.К.К. = 14,76	
15.		ПЦ 400 Д20 – 50; МК – 45; В – 59,3; М1 – 5; ГП – 0,002	К.К.К. = 10,8	
16.		ПЦ 400 Д20 – 30; МК – 60; В – 61,0; М1 – 10; ГП – 0,002	К.К.К. = 11,09	
17.		ПЦ 400 Д20 – 40; МК – 50; В – 60,1; М1 – 10; ГП – 0,002	К.К.К. = 14,82	
18.		ПЦ 400 Д20 – 50; МК – 40; В – 58,5; М1 – 10; ГП – 0,002	К.К.К. = 13,08	
19.		ПЦ 400 Д20 – 30; МК – 65; В – 61,3; М2 – 5; ГП – 0,002	К.К.К. = 9,35	
20.		ПЦ 400 Д20 – 40; МК – 55; В – 60,4; М2 – 5; ГП – 0,002	К.К.К. = 10,82	
21.		ПЦ 400 Д20 – 50; МК – 45; В – 58,9; М2 – 5; ГП – 0,002	К.К.К. = 13,02	
22.		ПЦ 400 Д20 – 30; МК – 60; В – 60,1; М2 – 10; ГП – 0,002	К.К.К. = 10,66	
23.		ПЦ 400 Д20 – 40; МК – 50; В – 59,3; М2 – 10; ГП – 0,002	К.К.К. = 14,09	
24.		ПЦ 400 Д20 – 50; МК – 40; В – 57,6; М2 – 10; ГП – 0,002	К.К.К. = 14,47	
25.	Портландцемент ПЦ 500 ДО Отходы мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов (ММС) Вольский песок (ВП) Нижнеольшанский песок (НП) Отсев дробления кварцито-песчанника фракции (ОД) 5–2,5 мм 2,5–1,25 мм 1,25–0,63 мм 0,63–0,314 мм 0,314–0,16 мм менее 0,16 мм	Бетон ПЦ = 504 кг/м³; ВП = 1462 кг/м³; Вода = 212 кг/м³	Бетон р = 2185 кг/м³; Rсж = 55,25 МПа	3/[64]
26.		ВНВ с высокоплотной упаковкой заполнителя = 315 кг/м³ ОД ВУ = 1916 кг/м³, в т.ч.: 1095 кг/м³ (фр.5...2,5 мм) 383 кг/м³ (фр.2,5...1,25 мм) 274 кг/м³ (фр.1,25...0,63 мм) 165 кг/м³ (фр.0,63...0,314 мм) Вода = 128 кг/м³	р = 2410 кг/м³ Rсж = 58,5 МПа	
27.		ВНВ-50 = 493 кг/м³; ОД = 1528 кг/м³; Вода = 202 кг/м³	р = 2215 кг/м³; Rсж = 61,3 МПа	
28.		ВНВ-50 = 461 кг/м³; ВП = 1548 кг/м³; Вода = 189 кг/м³	р = 2198 кг/м³; Rсж = 48,2 МПа	
29.		ВНВ-50 = 573 кг/м³; НП = 1294 кг/м³; Вода = 248 кг/м³	р = 2115 кг/м³; Rсж = 31,7 МПа	
30.	Отходы мокрой сепарации (ММС) Песок Вольский (ВП) Клинкер (К) Портландцемент 500 ДО (ПЦ) Тонкомолотый многокомпонентный цемент (ТМЦ-50)	Вязущее ВНВ-50 ММС = 23,87%	Вязущее Сроки схватывания, мин. начало –130, конец – 310 Rсж7 = 30,7 МПа; Rиз7 = 4,77 МПа; Rсж28 = 51,3 МПа; Rиз28 = 5,96 МПа	3/[64]
31.		ВНВ-50 ВП = 18,75 %	Сроки схватывания, мин. начало –135, конец – 300 Rсж7 = 34,9 МПа; Rиз7 = 5,9 МПа; Rсж28 = 51,9 МПа; Rиз28 = 7,1 МПа	
32.		ТМЦ-50 ММС = 29,87%	Сроки схватывания, мин. начало –160, конец – 320	

№ сос тав а п/п	Виды сырья для композиционного вяжущего	Состав композиционного вяжущего/ бетона	Контролируемые параметры и физико-механические свойства композиционного вяжущего / бетона	Номер публикац ии/Ссылк а на источник
	Вяжущее низкой водопотребности (ВНВ-50)		Рсж7 = 34,7 МПа; Риз7 = 2,77 МПа; Рсж28 = 40,6 МПа; Риз28 = 5,4 МПа	
33.	Отсев дробления кварцитопесчанника фракцией 5÷0,314 (ОДК)	ТМЦ-50 ВП = 26,75 %	Сроки схватывания, мин. начало –155, конец – 310 Рсж7 = 34,2 МПа; Риз7 = 2,3 МПа; Рсж28 = 42,7 МПа; Риз28 = 3,8 МПа	
34.	Отсев дробления кварцитопесчанника с высокоплотной упаковкой	ПЦ = 24,75 %	Сроки схватывания, мин. начало –160, конец – 220 Рсж7 = 36,0 МПа; Риз7 = 6,8 МПа; Рсж28 = 51,0 МПа; Риз28 = 8,0 МПа	
35.	Песок (ОДК ВУ) Песок нижевольтанский (ПН)	Бетон ПЦ = 411 кг/м³; ВП = 1600 кг/м³; В = 241 кг/м³	Бетон р = 2175 кг/м³; Рсж = 28,4 МПа; Морозостойкость 150 циклов	
36.		ВНВ-50 = 406 кг/м³; ВП = 1624 кг/м³; В = 231,6 кг/м³	р = 2210 кг/м³; Рсж = 31,2 МПа; Морозостойкость 150 циклов	
37.		ВНВ-50 = 408 кг/м³; ОДК = 1632 кг/м³; В = 232,5 кг/м³	р = 2187 кг/м³; Рсж = 35,1 МПа; Морозостойкость 200 циклов	
38.		ВНВ-50 = 310 кг/м³ ОДК ВУ = 1916 кг/м³, в т.ч.: 1095 кг/м³ (фр.2,5...1,25 мм) 383 кг/м³ (фр.1,25...0,63 мм) 274 кг/м³ (фр.0,63...0,314 мм) 165 кг/м³ (фр.0,314 мм) В = 160 кг/м³	р = 2350 кг/м³ Рсж = 38,7 МПа Морозостойкость 200 циклов	
39.		ВНВ-50 = 441 кг/м³; ПН = 1543,5 кг/м³; В = 251 кг/м³	р = 2110 кг/м³; Рсж = 25,3 МПа; Морозостойкость 150 циклов	
40.	Белый портландцемент (БПЦ) Серый портландцемент (ПЦ) Отсевы дроблений кварцитопесчанника фракция 0...0,63мм (КВП)	Вяжущее ПЦ 80%; КВП 20%	Вяжущее рср = 2212 кг/м³; НГ = 17,5%; Сроки схватывания, мин. начало - 150, конец – 320 Риз = 11,3 МПа; Рсж = 78,5 МПа	4/[65]
41.	Мел (М) Пластифицирующая добавка SikaViscoCrete 32 SCC (СП) Песок (П)	Бетон ПЦ = 236 кг/м³=80%; КВП (<0,63мм) = 47,2 кг/м³=20%; КВП (0,63...2мм) = 50,9 кг/м³ КВП (2...5мм) = 86,2 кг/м³; П = 1630,9 кг/м³; В/Ц = 0,74 (220 л); СП = 0,58% (1,71 кг)	Бетон рср = 2190 кг/м³; Удобоукладываемость (ОК) = 18 см; Водоотделение (визуально) – незначительное Вид уплотнения – самоуплотнение (СУ): рср = 2057 кг/м³; Рсж = 34,4 МПа; Водопоглощение 6,9 % масс.; Морозостойкость > 100 циклов; Класс бетона В25 Вид уплотнения – виброуплотнение (ВУ): рср = 2185 кг/м³; Рсж = 39,5 МПа; Водопоглощение 6,1 % масс.; Класс бетона В30	
42.		Вяжущее БПЦ 80%; КВП 20%	Вяжущее рср = 2190 кг/м³; НГ = 17,0%; Сроки схватывания, мин. начало - 110, конец – 360 Риз = 12,7 МПа; Рсж = 74,1 МПа	
43.		ПЦ 80%; М 20%	рср = 2150 кг/м³; НГ = 18,5% Сроки схватывания, мин. начало - 140, конец – 330 Риз = 12,0 МПа; Рсж = 74,1 МПа	
44.		БПЦ 80%; М 20%	рср = 2178 кг/м³; НГ = 18,0%; Сроки схватывания, мин. начало - 130, конец – 320 Риз = 12,1 МПа; Рсж = 70,4 МПа	
45.		Бетон БПЦ = 245,6 кг/м³=80%; М = 61,4 кг/м³=20%; П = 1791,1 кг/м³; В/Ц = 0,71 (218 л); СП = 0,82% (2,52 кг)	Бетон рср = 2205 кг/м³; ОК = 17 см; Водоотделение (визуально) – отсутствует Вид уплотнения –СУ: рср = 2080 кг/м³; Рсж = 33,5 МПа; Водопоглощение 6,2 % масс.; Морозостойкость > 100 циклов; Класс бетона В25 Вид уплотнения –ВУ: рср = 2190 кг/м³; Рсж = 38,4 МПа; Водопоглощение 5,7 % масс.; Класс бетона В25	
46.		Вяжущее ПЦ 60%; КВП 40%	Вяжущее рср = 2197 кг/м³; НГ = 19,0%; Сроки схватывания, мин. начало - 130, конец – 400 Риз = 11,7 МПа; Рсж = 60,7 МПа	
47.		ПЦ 60%; КВП 20%; М 20%	рср = 2240 кг/м³; НГ = 16,5%; Сроки схватывания, мин. начало - 160, конец – 350 Риз = 11,7 МПа; Рсж = 69,4 МПа	
48.		Бетон ПЦ = 191,4 кг/м³=60%; М = 63,8 кг/м³=20%; КВП (<0,63мм) = 63,8 кг/м³=20%; КВП (0,63...2мм) = 55,1 кг/м³; КВП (2...5мм) = 93,3 кг/м³; П = 1706,6 кг/м³; В/Ц = 0,68 (217 л); СП = 0,62% (1,98 кг)	Бетон рср = 2214 кг/м³; ОК = 18 см; Водоотделение (визуально) – незначительное Вид уплотнения –СУ: рср = 2058 кг/м³; Рсж = 35,7 МПа; Водопоглощение 5,2 % масс.; Морозостойкость > 150 циклов; Класс бетона В25 Вид уплотнения –ВУ: рср = 2130 кг/м³; Рсж = 39,0 МПа; Водопоглощение 4,7 % масс.; Класс бетона В30	
49.		Вяжущее БПЦ 60%; КВП 20%; М 20%	Вяжущее рср = 2171 кг/м³; НГ = 16,0%; Сроки схватывания, мин. начало - 130, конец – 320 Риз = 11,4 МПа; Рсж = 64,7 МПа	
50.		Бетон ПЦ = 215,4 кг/м³=60%; М = 71,8 кг/м³=20%; КВП (<0,63мм) = 71,8 кг/м³=20%; КВП	Бетон рср = 2250 кг/м³; ОК = 18 см; Водоотделение (визуально) – отсутствует	

№ сос тав а п/п	Виды сырья для композиционного вяжущего	Состав композиционного вяжущего/ бетона	Контролируемые параметры и физико-механические свойства композиционного вяжущего / бетона	Номер публикац ии/Ссылк а на источник
		(0,63...2мм) = 62,4 кг/м³; КВП (2...5мм) = 105,6 кг/м³; П = 1638,0 кг/м³; В/Ц = 0,6 (215 л); СП = 0,8% (2,87 кг)	Вид уплотнения –СУ: рсп = 2102 кг/м³; Рсж = 32,1 МПа; Водопоглощение 4,8 % масс.; Морозостойкость > 150 циклов; Класс бетона В25 Вид уплотнения –ВУ: рсп = 2160 кг/м³; Рсж = 35,6 МПа; Водопоглощение 4,2 % масс.; Класс бетона В25	
51.		Вяжущее БПЦ 60%; М 40%	Вяжущее рсп = 2155 кг/м³; НГ = 19,5%; Сроки схватывания, мин. начало - 150, конец – 330 Риз = 12,7 МПа; Рсж = 57,0 МПа	
52.		ПЦ + СП	рсп = 2187 кг/м³; НГ = 20,5%; Сроки схватывания, мин. начало - 140, конец – 310 Риз = 10,5 МПа; Рсж = 64,1 МПа	
53.		ПЦ	рсп = 2150 кг/м³; НГ = 27,0%; Сроки схватывания, мин. начало - 130, конец – 270 Риз = 8,4 МПа; Рсж = 51,0 МПа	
54.		Бетон ПЦ = 383 кг/м³; П = 1713 кг/м³; В/Ц = 0,56 (214 л); СП = 0,65% (2,5 кг)	Бетон рсп = 2210 кг/м³; ОК = 19 см; Водоотделение (визуально) – незначительное Вид уплотнения –СУ: рсп = 2070 кг/м³; Рсж = 33,6 МПа; Водопоглощение 5,7 % масс.; Морозостойкость > 100 циклов; Класс бетона В25 Вид уплотнения –ВУ: рсп = 2190 кг/м³; Рсж = 40,5 МПа; Водопоглощение 4,0 % масс.; Класс бетона В30	
55.		БПЦ = 451 кг/м³; П = 1665 кг/м³; В/Ц = 0,47 (212 л); СП = 0,65% (2,93 кг)	рсп = 2245 кг/м³; ОК = 20 см; Водоотделение (визуально) – незначительное Вид уплотнения –СУ: рсп = 2029 кг/м³; Рсж = 32,5 МПа; Водопоглощение 6,1 % масс.; Морозостойкость > 100 циклов; Класс бетона В25 Вид уплотнения –ВУ: рсп = 2156 кг/м³; Рсж = 38,7 МПа; Водопоглощение 4,2 % масс.; Класс бетона В30	
56.	Портландцемент М 400 (ПЦ) Песок Мкр 2,5 (П) Щебень фракции 5-10 (Щ)	Бетон ПЦ = 450 кг/м³; П = 650 кг/м³; Щ = 1151 кг/м³; ОК = 8-10 см	Бетон Скорость вращения при создании тела вращения не менее 300 об/мин. Длительность уплотнения от 50 до 180 сек. Стыковочный шов отсутствует.	5/[66]
2. Состав и свойства архитектурного и декоративного бетона, применение которого возможно при производстве тонкостенных изделий				
57.	Белый портландцемент марки М 400	Бетон ПЦ/П = 1:3; В/Ц = 0,49	Бетон Рсж3 = 11,2 МПа; Рсж7 = 18,8 МПа; Рсж28 = 35,0 МПа	6/[37]
58.	Кварцевый песок с модулем крупности М 1,6	ПЦ/П = 1:3; С-3 = 0,6 % от массы цемента; В/Ц = 0,412	Водоредуцирующий эффект 11%; Рсж3 = 15,2 МПа; Рсж7 = 32,8 МПа; Рсж28 = 42,4 МПа	
59.	Добавка ViscoCrete®-3088	ПЦ/П = 1:3; ViscoCrete®-3088 = 0,8 % от массы цемента; В/Ц = 0,36	Водоредуцирующий эффект 24,5%; Рсж3 = 38,4 МПа; Рсж7 = 48,2 МПа; Рсж28 = 58,5 МПа	
60.	Карбонаткальциевый отход производства нитроаммофоски (конверсионный мел КМ)	КМ 10% от ПЦ; ПЦ+КМ/П = 1:3; ViscoCrete®-3088 = 0,8 % от массы цемента В/Т = 0,37	Рсж28 = 42,4 МПа	
61.		КМ 50% от ПЦ; ПЦ+КМ/П = 1:3; ViscoCrete®-3088 = 0,8 % от массы цемента В/Т = 0,33	Рсж28 = 23,7 МПа	
62.	Портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н, белый без минеральных добавок 1-го сорта (ПЦБ 1-500-Д0).	Бетон ПЦ к П = 1:3; В/Ц = 0,41	Бетон Рсж3 = 4,31 МПа; Рсж28 = 40,12 МПа; Подвижность смеси П1	7/[38]
63.	Производитель ОАО «Щуровский цемент» (ПЦ)	ПЦ к П = 1:3; В/Ц = 0,368; СП1 = 3%	Рсж3 = 3,82 МПа; Рсж28 = 45,61 МПа; Подвижность смеси с П1 до П3	
64.	Кварцевый песок строительный, просушенный, фракций: 0,19–0,28; (П) 0,31–0,63; до 2,5 мм; (П) Суперпластификатор-1 на основе сульфированного нафталин-формальдегидного конденсата (СП1) Суперпластификатор-2 на основе сульфоната меламина (СП2) Гиперпластификатор на основе эфиров поликарбонкислатов (ГП)	ПЦ к П = 1:3; В/Ц = 0,322; СП2 = 2,5%	Рсж3 = 4,20 МПа; Рсж28 = 46,85 МПа; Подвижность смеси с П1 до П3	
65.	Серый портландцемент Красноярский М500 ДО Белый цемент CEM I 52,5R Alborg Weit, Египет Отсевы камнедробления гранита, мрамора и известняка,	Бетон Портландцемент Красноярский – 700 кг на 1м³; Гранит молотый (Пм); СУД = 3700 см²/г – 300 кг на 1м³; Песок тонкий гранитный (Пг), фр. 0,16-0,63 мм – 700 кг на 1м³; Песок крупный гранитный (Пз) фр. 0,63÷2,5 мм – 470 кг на 1м³; ГП Melfux 5581P – 7 кг на 1м³; Вода – 230 кг на 1м³	Бетон р = 2415 кг/м³; Пм/Ц = 0,43; Пг/Ц = 1; Пз/Ц = 0,67; СП/Ц = 2,1 Прочность через 28 сут. Риз = 18,6 МПа; Рсж = 126 МПа; В/Ц=0,328; В/Т=0,105; Расплав Км 460х460 мм; Ц _{RC} ^{УЛ} = 5,55 кг/МПа; R _Ц ^{УЛ} = 0,18 МПа/кг;	8/[39]

№ сос тав а п/п	Виды сырья для композиционного вяжущего	Состав композиционного вяжущего/ бетона	Контролируемые параметры и физико-механические свойства композиционного вяжущего / бетона	Номер публикац ии/Ссылк а на источник
	рассеянные на фракции 0-Ю, 16 мм, 0,16-Ю, 63 мм, 0,63-2,5 мм или 0,63-5 мм соответственно.		$\sigma_{Rи}^{УД} = 37,6$ кг/МПа; $R_c/R_{и} = 6,77$; $I_{Пт}^{БД} = 0,26$; $I_{Пз}^{БДТ} = 4,854$ Купп. = 0,99; Ств = 76,7%; $V_{вд} = 569,1$; $C_{вд} = 57,5\%$; $V_{вдт} = 820,9$; $C_{вдт} = 82,9\%$	
66.	Каменную муку получали путем помола фракции 0-Ю, 16 мм в лабораторной шаровой мельнице до удельной поверхности $S_{уд} = 3400-4800$ cm^2/g . Пластификатор: германский ГП Melfux 5581F	Цемент белый Египетский СЕМ 52.5 – 700 кг на $1m^3$; Известняк молотый (Пм) $S_{УД} = 3400$ cm^2/g – 300 кг на $1m^3$; Песок тонкий известняк (Пг), фр. 0,16-0,63 мм – 700 кг на $1m^3$; Песок крупный известняк (Пз) фр. 0,63÷2,5 мм – 470 кг на $1m^3$; ГП Melfux 5581P – 7 кг на $1m^3$; Вода – 186 кг на $1m^3$	$p = 2392$ кг/ m^3 ; Пм/Ц = 0,43; Пг/Ц = 1; Пз/Ц = 0,67; $\Sigma П/Ц = 2,1$ Прочность через 28 сут. $R_{из} = 18,5$ МПа; $R_{сж} = 130$ МПа; $B/Ц = 0,266$; $B/T = 0,085$; Расплав Км 430х431 мм; $\sigma_{Rc}^{УД} = 5,38$ кг/МПа; $R_{Ц}^{УД} = 0,18$ МПа/кг; $\sigma_{Rи}^{УД} = 37,8$ кг/МПа; $R_c/R_{и} = 7,02$; $I_{Пт}^{БД} = 2,04$; $I_{Пз}^{БДТ} = 4,52$; Купп. = 0,974; Ств = 80,6%; $V_{вд} = 528,9$; $C_{вд} = 54,9\%$; $V_{вдт} = 788,1$; $C_{вдт} = 81,9\%$	
67.		Цемент белый Египетский СЕМ 52.5 – 700 кг на $1m^3$; Мрамор молотый (Пм) $S_{УД} = 3800$ cm^2/g – 300 кг на $1m^3$; Песок тонкий мраморный (Пг), фр. 0,16-0,63 мм – 700 кг на $1m^3$; Песок крупный мраморный (Пз) фр. 0,63÷2,5 мм – 470 кг на $1m^3$; ГП Melfux 5581P – 7 кг на $1m^3$; Вода – 200 кг на $1m^3$	$p = 2496$ кг/ m^3 ; Пм/Ц = 0,43; Пг/Ц = 1; Пз/Ц = 0,67; $\Sigma П/Ц = 2,1$ Прочность через 28 сут. $R_{из} = 19,1$ МПа; $R_{сж} = 127$ МПа $B/Ц = 0,285$; $B/T = 0,091$; Расплав Км 525х522 мм; $\sigma_{Rc}^{УД} = 5,5$ кг/МПа; $R_{Ц}^{УД} = 0,18$ МПа/кг; $\sigma_{Rи}^{УД} = 36,6$ кг/МПа; $R_c/R_{и} = 6,65$; $I_{Пт}^{БД} = 2,21$; $I_{Пз}^{БДТ} = 4,79$; Купп. = 0,985; Ств = 78,6%; $V_{вд} = 534,6$; $C_{вд} = 56,9\%$; $V_{вдт} = 776$; $C_{вдт} = 78,6\%$	
68.	“Лежалый” фосфогипс Балаковского филиала (БФ АО “Апатит”)	Бетон Ф/И = 2:1; Ц = 30 %; П = 15 %; пигмента 5 %; В/Т = 2:1	Бетон $R_{сж} = 23,5$ МПа; $R_{из} = 3,6$ МПа	9/[67]
69.	Известь (И)	Ф/И = 2:1; Ц = 30 %; П = 15 %; пигмента 5 %; В/Т = 2:1; Л = 10%	$R_{сж} = 24,5$ МПа; $R_{из} = 4,0$ МПа	
70.	Гидравлический вяжущий цемент М500 (Ц)	Ф/И = 2:1; Ц = 30 %; П = 15 %; пигмента 5 %; В/Т = 2:1; АЭ = 10%	$R_{сж} = 19,8$ МПа; $R_{из} = 3,1$ МПа	
71.	Мелкий песок (П)	Ф/И = 2:1; Ц = 30 %; П = 15 %; пигмента 5 %; В/Т = 2:1; АЭ = 10%	$R_{сж} = 19,5$ МПа; $R_{из} = 3,6$ МПа	
72.	Противоморозная добавка “ЛАКРА” на основе нитрита кальция (Л) Гидроизоляция добавка “ПенетронАдмикс” (ПА) Акриловая эмульсия (АЭ) Базальтовые волокна (БВ)	Ф/И = 2:1; Ц = 60 %; П = 15 %; пигмента 5 %; В/Т = 2:1; Л = 10%; ПА = 5%	$R_{сж} = 27,5$ МПа; $R_{из} = 4,5$ МПа	
73.	Готовая смесь на основе белого цемента AalborgExtreme 120	Бетон Готовая смесь на основе белого цемента AalborgExtreme 120 Вода	Бетон Размер зерен заполнителя менее 3 мм Усадка при твердении по EN12617 (образцы в виде призм размерами 40х40х160 мм) в возрасте 90 сут. менее 600 мкм/м Время схватывания по Проктору (до достижения прочности 3,5 МПа) 6,5 – 7,5 ч. Предел прочности при сжатии по EN196-1 (образцы в виде призм размерами 40х40х160 мм) в возрасте 1 сут. более 75 МПа в возрасте 28 сут. более 130 МПа Модуль Юнга по EN12390-13 в возрасте 28 сут. 50 ГПа Предел прочности при изгибе по EN12390-5 (образцы в виде призм размерами 100х100х500 мм) в возрасте 28 сут. более 14 МПа	10/[56]
74.	Белый цемент Shargh Cement Co. (Ц) Белый каменный порошок (Сабзеvar, Иран) (БКП) Гранитный порошок (Мешхеда, Иран) (ГП)	Бетон $B/Ц = 0,475$; Ц = 400 кг/ m^3 ; БКП = 150 кг/ m^3 ; В = 190 кг/ m^3 ; СП = 8 кг/ m^3 ; ГП = 600 кг/ m^3 ; БП = 900 кг/ m^3 ; ВМД = 4 кг/ m^3	Бетон Расплав конуса = 80 см; $R_{сж} = 42,2$ МПа; Модуль упругости $E = 33$ ГПа; $W28 = 2,1\%$; После 100 циклов замораживания/оттаивания: Потеря в весе = 0,74 %; Потеря прочности при сжатии = 4,76 %	11/[45]
75.	Белый пигмент (Сабзеvar, Иран) (БП) Красный шлам Джаджармский глиноземный завод (расположен в провинции Северный Хорасан) (КШ) Суперпластификатор Sakhteman Shimi Co. (СП) Вязкостная модифицирующая добавка (ВМД)	$B/Ц = 0,475$; Ц = 390 кг/ m^3 ; КШ = 10 кг/ m^3 ; БКП = 150 кг/ m^3 ; В = 190 кг/ m^3 ; СП = 8 кг/ m^3 ; ГП = 600 кг/ m^3 ; БП = 900 кг/ m^3 ; ВМД = 4 кг/ m^3	Расплав конуса = 79 см; $R_{сж} = 42,5$ МПа; $E = 29,8$ ГПа; $W28 = 2,25\%$; После 100 циклов замораживания/оттаивания: Потеря в весе = 0,72 %; Потеря прочности при сжатии = 5,95 %	
76.	Хорасан) (КШ) Суперпластификатор Sakhteman Shimi Co. (СП) Вязкостная модифицирующая добавка (ВМД)	$B/Ц = 0,475$; Ц = 380 кг/ m^3 ; КШ = 20 кг/ m^3 ; БКП = 150 кг/ m^3 ; В = 190 кг/ m^3 ; СП = 8 кг/ m^3 ; ГП = 600 кг/ m^3 ; БП = 900 кг/ m^3 ; ВМД = 4 кг/ m^3	Расплав конуса = 77 см; $R_{сж} = 39,1$ МПа; $E = 29,4$ ГПа; $W28 = 2,3\%$; После 100 циклов замораживания/оттаивания: Потеря в весе = 0,7 %; Потеря прочности при сжатии = 5,98 %	
77.	ZhikavaCo	$B/Ц = 0,475$; Ц = 370 кг/ m^3 ; КШ = 30 кг/ m^3 ; БКП = 150 кг/ m^3 ; В = 190 кг/ m^3 ; СП = 8 кг/ m^3 ; ГП = 600 кг/ m^3 ; БП = 900 кг/ m^3 ; ВМД = 4 кг/ m^3	Расплав конуса = 77 см; $R_{сж} = 36,7$ МПа; $E = 28,9$ ГПа; $W28 = 2,42\%$; После 100 циклов замораживания/оттаивания: Потеря в весе = 0,67 %; Потеря прочности при сжатии = 6,02 %	
78.		$B/Ц = 0,475$; Ц = 400 кг/ m^3 ; КШ = 37,5 кг/ m^3 ; БКП = 112,5 кг/ m^3 ; В = 190 кг/ m^3 ; СП = 9 кг/ m^3 ; ГП = 600 кг/ m^3 ; БП = 900 кг/ m^3 ; ВМД = 4 кг/ m^3	Расплав конуса = 75 см; $R_{сж} = 40,0$ МПа; $E = 32$ ГПа; $W28 = 2,4\%$; После 100 циклов замораживания/оттаивания: Потеря в весе = 0,66 %; Потеря прочности при сжатии = 5,88 %	
79.		$B/Ц = 0,475$; Ц = 400 кг/ m^3 ; КШ = 75 кг/ m^3 ; БКП = 75 кг/ m^3 ; В = 190 кг/ m^3 ; СП = 10 кг/ m^3 ; ГП = 600 кг/ m^3 ; БП = 900 кг/ m^3 ; ВМД = 4 кг/ m^3	Расплав конуса = 72 см; $R_{сж} = 39,3$ МПа; $E = 29,0$ ГПа; $W28 = 2,7\%$; После 100 циклов замораживания/оттаивания: Потеря в весе = 0,63 %; Потеря прочности при сжатии = 6,72 %	

№ сос тав а п/п	Виды сырья для композиционного вяжущего	Состав композиционного вяжущего/ бетона	Контролируемые параметры и физико-механические свойства композиционного вяжущего / бетона	Номер публикац ии/Ссылк а на источник
80.		В/Ц = 0,475; Ц = 400 кг/м³; КШ = 112,5 кг/м³; БКП = 37,5 кг/м³; В = 190 кг/м³; СП = 11 кг/м³; ГП = 600 кг/м³; БП = 900 кг/м³; ВМД = 4 кг/м³	Расплав конуса = 71 см; Рсж = 38,0 МПа; Е = 29,0 ГПа; W28 = 2,9 %; После 100 циклов замораживания/оттаивания: Потеря в весе = 0,58 %; Потеря прочности при сжатии = 6,05 %	
81.	Белый цемент BL II/A-L 42,5 Рфирмы Lafarge (БЦ) Зеленое переработанное стекло (фракции от 4 до 8 мм) (ЗС) Природный песок (фракция до 2 мм) (П) Полипропиленовые волокна SikaFiber (ПВ)	Бетон В/Ц = 0,48; БЦ = 6,25 кг; П = 8,75 кг; В = 3 л	Бетон Образцы испытывали на 14 суток: Рсж = 25,26 МПа; Риз = 0,69 кН	12/[46]
82.		В/Ц = 0,48; БЦ = 6,25 кг; П = 8,75 кг; ЗС = 13,75 кг; В = 3 л	Рсж = 19,79 МПа; Риз = 0,8 кН	
83.		В/Ц = 0,48; БЦ = 6,25 кг; П = 8,75 кг; ЗС = 27,5 кг; В = 3 л; ПВ = 1/4	Рсж = 9,6 МПа; Риз = 0,44 кН	
84.	Портландцемент CEM I 42,5 RHolcimSlovakia s. r. o. (ПЦ) Заполнитель Geka 0-4мм и 4-8 мм (З)	Бетон ПЦ, З, Вода	Бетон Рсж = 27,64 МПа; W = 6,58%; p = 2430 кг/м³	13/[61]
85.		ПЦ, З, Вода, ЖП красный 5% от массы вяжущего	Рсж = 30,25 МПа; W = 7,5%; p = 2410 кг/м³	
86.	Жидкий пигмент красного, желтого и коричневого цвета	ПЦ, З, Вода, ЖП желтый 5% от массы вяжущего	Рсж = 24,63 МПа; W = 7,64%; p = 2360 кг/м³	
87.	фирмы Remei CZ s. r. o. (ЖП) Зола-уноса (ЗУ)	ПЦ, З, Вода, ЖП коричневый 5% от массы вяжущего	Рсж = 32,97 МПа; W = 6,87%; p = 2290 кг/м³	
88.		ПЦ, З, Вода, ЗУ 25% от массы цемента	Рсж = 21,77 МПа; W = 9,01%; p = 2240 кг/м³	
89.		ПЦ, З, Вода, ЖП красный 5% от массы цемента, ЗУ 25% от массы цемента	Рсж = 22,16 МПа; W = 8,53%; p = 2280 кг/м³	
90.		ПЦ, З, Вода, ЖП желтый 5% от массы цемента, ЗУ 25% от массы цемента	Рсж = 18,59 МПа; W = 8,86%; p = 2340 кг/м³	
91.		ПЦ, З, Вода, ЖП коричневый 5% от массы цемента, ЗУ 25% от массы цемента	Рсж = 27,38 МПа; W = 8,33%; p = 2250 кг/м³	
92.	Серый цемент типа IASTMC150 (СЦ) Белый цемент типа I ASTMC150 (Северный Ливан) (БЦ) Суперпластификатор Conplast 430 Fosroc (Германия) (СП) Крупный заполнитель (КП) Песок (П)	Бетон Номинальная прочность на сжатие – 20 МПа; СЦ = 294 кг; В = 217 кг; В/Ц – 0,74; П = 730 кг; КП = 1041 кг	Бетон Усадка 5 см; Содержание воздуха 2,33 %; Сроки схватывания: начало – 256 мин. конец – 470 мин. Прочность бетонных образцов на растяжение при раскалывании = 2,10 МПа; Прочность на изгиб Риз = 3,20 МПа	14/[51]
93.		Номинальная прочность на сжатие – 40 МПа; СЦ = 430 кг; В = 205 кг; В/Ц – 0,48; П = 722 кг; КП = 960 кг; СП = 1 л/100 кг	Усадка 15 см; Содержание воздуха 2,5 %; Сроки схватывания: начало – 189 мин. конец – 279 мин. Прочность бетонных образцов на растяжение при раскалывании = 2,71 МПа; Риз = 5,72 МПа	
94.		Номинальная прочность на сжатие – 60 МПа; СЦ = 630 кг; В = 193 кг; В/Ц – 0,31; П = 594 кг; КП = 1007 кг; СП = 2 л/100 кг	Усадка 25 см; Содержание воздуха 2,4 %; Прочность бетонных образцов на растяжение при раскалывании = 3,34 МПа; Риз = 7,44 МПа	
95.		Номинальная прочность на сжатие – 20 МПа; БЦ = 294 кг; В = 217 кг; В/Ц – 0,74; П = 730 кг; КП = 1041 кг;	Усадка 8,5 см; Содержание воздуха 2,35 %; Сроки схватывания: начало – 155 мин. конец – 230 мин. Прочность бетонных образцов на растяжение при раскалывании = 1,81 МПа; Риз = 3,28 МПа	
96.		Номинальная прочность на сжатие – 40 МПа; БЦ = 430 кг; В = 205 кг; В/Ц – 0,48; П = 722 кг; КП = 960 кг; СП = 1 л/100 кг	Усадка 25 см; Содержание воздуха 2,1 %; Сроки схватывания: начало – 180 мин. конец – 240 мин. Прочность бетонных образцов на растяжение при раскалывании = 2,61 МПа; Риз = 5,83 МПа	
97.		Номинальная прочность на сжатие – 60 МПа; БЦ = 630 кг; В = 193 кг; В/Ц – 0,31; П = 594 кг; КП = 1007 кг; СП = 2 л/100 кг	Усадка 25 см; Содержание воздуха 2,5 %; Прочность бетонных образцов на растяжение при раскалывании = 2,97 МПа; Риз = 8,26 МПа	
98.	Белый портландцемент 42,5 Турция (БЦ) Дробленый белый мрамор фракций: – мелкая 5 мм (ММ) – средняя 7-15 мм (СМ) – крупная 15-25 мм (КМ)	Бетон БЦ = 312 кг/м³; ММ = 1050 кг/м³; СМ = 455 кг/м³; КМ = 275 кг/м³; В = 171 кг/м³	Бетон Усадка 9 см; Рсж = 35,5 МПа	15/[52]
99.		БЦ = 351 кг/м³; ММ = 1050 кг/м³; СМ = 455 кг/м³; КМ = 275 кг/м³; В = 185 кг/м³	Усадка 8 см; Рсж = 36,0 МПа	
100.		БЦ = 383 кг/м³; ММ = 1050 кг/м³; СМ = 455 кг/м³; КМ = 275 кг/м³; В = 196 кг/м³	Усадка 7 см; Рсж = 44,9 МПа	
101.	Мелкодисперсная пемза (МП) Микрокремнезем Антальяского электрометаллургического завода (МК)	БЦ = 312 кг/м³; ММ = 1050 кг/м³; СМ = 725 кг/м³; В = 180 кг/м³	Усадка 8 см; Рсж = 27,0 МПа	
102.		БЦ = 351 кг/м³; ММ = 1050 кг/м³; СМ = 725 кг/м³; В = 194 кг/м³	Усадка 8 см; Рсж = 36,9 МПа	
103.	Зола-унос ТЭС Soma-B (ЗУ)	БЦ = 383 кг/м³; ММ = 1050 кг/м³; СМ = 725 кг/м³; В = 210 кг/м³	Усадка 9 см; Рсж = 43,0 МПа	
104.		БЦ = 150 гр; МП = 1000 гр; В/Ц 50%	Рсж = 12,0 МПа	
105.		БЦ = 250 гр; МП = 1000 гр; ЗУ = 100 гр; В/Ц 50%	Рсж = 9,5 МПа	
106.		БЦ = 150 гр; МП = 1000 гр; ЗУ = 100 гр; В/Ц 43%; СП = 1%	Рсж = 14,5 МПа	
107.		БЦ = 150 гр; МП = 1000 гр; МК = 100 гр; В/Ц 50%	Рсж = 9,5 МПа	
108.	Днепропетровский шлак (ДШ) Негигроскопичный метасиликат натрия Отбеливающие добавки каолин класса КН 84 (90%) и каолин класса КН 84 (84%)	Бетон Днепропетровский шлак (ДШ) Негигроскопичный метасиликат натрия Отбеливающие добавки каолин класса КН 84 (90%) и каолин класса КН 84 (84%)	Бетон Рсж = 57,0 МПа Степень белизны 89,4 %	16/[68]

№ сос тав а п/п	Виды сырья для композиционного вяжущего	Состав композиционного вяжущего/ бетона	Контролируемые параметры и физико-механические свойства композиционного вяжущего / бетона	Номер публикац ии/Ссылк а на источник
	Песок Гусаровского месторождения Харьковской области	Песок Гусаровского месторождения Харьковской области		
109.	Портландцемент М400 – серый (СЦ) – белый (БЦ)	Бетон ЦЦ = 600 кг/м³; КП = 1410 кг/м³; В = 305 л/м³	Бетон Подвижность 5 см; Рсж = 16,7 МПа; р = 2150 кг/м³; Водопоглощение 8,4%	17/[40]
110.	– цветной (ЦЦ) Кварцевый песок	БЦ = 407 кг/м³; КП = 488 кг/м³; ГЦ = 1342 кг/м³; В = 205 л/м³	Подвижность 5 см; Рсж = 17,1 МПа; р = 2215 кг/м³; Водопоглощение 8,1%	
111.	Мкр = 2-3 (КП) Щебень фракции 5-10 мм	БЦ = 370 кг/м³; КП = 750 кг/м³; ИЦ = 1125 кг/м³; В = 192 л/м³	Подвижность 6 см; Рсж = 16,4 МПа; р = 2035 кг/м³; Водопоглощение 8,6%	
112.	– известняковый (ИЩ) – гранитный (ГЩ)	БЦ = 442 кг/м³; КП = 1430 кг/м³; КГ = 1430 кг/м³; В = 272 л/м³	Подвижность 5 см; Рсж = 17,6 МПа; р = 2310 кг/м³; Водопоглощение 8,8%	
113.	Крошка гранитная 0,63-1,25 мм (КГ)	СЦ = 302 кг/м³; КП = 407 кг/м³; ИЩ = 1450 кг/м³; В = 278 л/м³	Подвижность 6 см; Рсж = 15,8 МПа; р = 2100 кг/м³; Водопоглощение 9,1 %	
114.	Портландцемент М400 (ПЦ) Тонкомолотая добавка (молотый шлакопемзовый песок) (ТД) Шлакопемзовый песок (ШП) Гранулированный доменной шлак (ГШ) Гранитный щебень фракции (ГЩ)	Бетон ПЦ = 16,9 мас.%; ТД = 15,8 мас.%; ШП = 67,3 мас.%	Бетон Влажность 3 мас.%; Рсж = 22 МПа; р = 1720 кг/м³; Водопоглощение 14 %; Коэффициент теплопроводности образца в сухом состоянии КТП = 0,326 Вт/(м·°C); Морозостойкость 300 циклов; Цвет бетона – серый; Класс прочности В15	18/[54]
115.	Пигмент – капут-мортум (ПК) – венецианская красная (ПВК)	ПЦ = 16,9 мас.%; ТД = 15,8 мас.%; ШП = 67,3 мас.%; ПК = 3 мас.%; ПВК = 3 мас.%	Влажность 1,2/1,4 мас.%; Рсж = 22,5/23,3 МПа; р = 1880/1920 кг/м³; Водопоглощение 13,9/13,8 %; Морозостойкость 305/310 циклов; Цвет бетона – бордовый светлых тонов/розовый светлых тонов; Класс прочности В15	
116.		ПЦ = 16,9 мас.%; ТД = 15,8 мас.%; ШП = 67,3 мас.%; ПК = 6 мас.%; ПВК = 6 мас.%	Влажность 1,6/1,0 мас.%; Рсж = 24,5/27,7 МПа; р = 1990/1910 кг/м³; Водопоглощение 13,3/12,8 %; КТП = –/0,394 Вт/(м·°C); Морозостойкость 315/315 циклов; Цвет бетона – бордовый/малиновый; Класс прочности В15	
117.		ПЦ = 16,9 мас.%; ТД = 15,8 мас.%; ШП = 67,3 мас.%; ПК = 9 мас.%; ПВК = 9 мас.%	Влажность 1,5/1,3 мас.%; Рсж = 22,6/25,6 МПа; р = 1910/1910 кг/м³; Водопоглощение 13,6/13,6 %; Морозостойкость 310/310 циклов; Цвет бетона – насыщенный бордовый/ насыщенный розово-красный; Класс прочности В15	
118.		ПЦ = 20,3 мас.%; ТД = 18,2 мас.%; ГШ = 61,5 мас.%	Влажность 4,2 мас.%; Рсж = 23,0 МПа; р = 1700 кг/м³; Водопоглощение 18,6 %; КТП = 0,455 Вт/(м·°C); Морозостойкость 300 циклов; Цвет бетона – серый; Класс прочности В15	
119.		ПЦ = 20,3 мас.%; ТД = 18,2 мас.%; ГШ = 61,5 мас.%; ПВК = 3 мас.%	Влажность 3,3 мас.%; Рсж = 25,7 МПа; р = 1950 кг/м³; Водопоглощение 16,6 %; Морозостойкость 310 циклов; Цвет бетона – розовый светлых тонов; Класс прочности В15	
120.		ПЦ = 20,3 мас.%; ТД = 18,2 мас.%; ГШ = 61,5 мас.%; ПВК = 6 мас.%	Влажность 2,7 мас.%; Рсж = 29 МПа; р = 1960 кг/м³; Водопоглощение 16,3 %; Морозостойкость 315 циклов; Цвет бетона – малиновый; Класс прочности В20	
121.		ПЦ = 20,3 мас.%; ТД = 18,2 мас.%; ГШ = 61,5 мас.%; ПВК = 9 мас.%	Влажность 1,6 мас.%; Рсж = 28 МПа; р = 1960 кг/м³; Водопоглощение 17 %; Морозостойкость 310 циклов; Цвет бетона – насыщенный розово-красный; Класс прочности В20	
122.	Белый цемент ОАО «Щуровский цемент» (Ц) Песок (П) Щебень (Щ) Добавка С-3	Бетон Ц = 266 кг/м³; П = 710 кг/м³; Щ = 1184 кг/м³; В = 195 кг/м³; В/Ц = 0,73	Бетон р = 2355 кг/м³ через 30 мин. после изг.; Осадка конуса, через – 5 мин. = 8 см, – 30 мин. = 5 см, – 60 мин. = 2 см; Рсж = 22,9 МПа; Марка по морозостойкости F100	19/[69]
123.		Ц = 303 кг/м³; П = 650 кг/м³; Щ = 1215 кг/м³; В = 200 кг/м³; В/Ц = 0,66	р = 2368 кг/м³ через 30 мин. после изг.; Осадка конуса, через – 5 мин. = 10 см, – 30 мин. = 6 см, – 60 мин. = 3 см; Рсж = 28,5 МПа; Марка по морозостойкости F150	
124.		Ц = 300 кг/м³; П = 712 кг/м³; Щ = 1230 кг/м³; В = 162 кг/м³; В/Ц = 0,54; С-3 = 0,8 %	р = 2404 кг/м³ через 30 мин. после изг.; Осадка конуса, через – 5 мин. = 14 см, – 30 мин. = 5 см, – 60 мин. = 2 см; Рсж = 38,2 МПа; Марка по морозостойкости F200	
125.		Ц = 393 кг/м³; П = 646 кг/м³; Щ = 1141 кг/м³; В = 210 кг/м³; В/Ц = 0,53	р = 2390 кг/м³ через 30 мин. после изг.; Осадка конуса, через – 5 мин. = 12 см, – 30 мин. = 8 см, – 60 мин. = 4 см; Рсж = 36,4 МПа; Марка по морозостойкости F200	
126.		Ц = 560 кг/м³; П = 1560 кг/м³; В = 165 кг/м³; В/Ц = 0,29	р = 2285 кг/м³; Коэфф.уплот. 0,95; Водопоглощение 5%; Рсж = 47 МПа; Марка по морозостойкости F200	
127.		Ц = 556 кг/м³; П = 1550 кг/м³; В = 164 кг/м³; В/Ц = 0,29	р = 2270 кг/м³; Коэфф.уплот. 0,91; Водопоглощение 5,5%; Рсж = 45,8 МПа; Марка по морозостойкости F200	
128.		Ц = 544 кг/м³; П = 1516 кг/м³; В = 160 кг/м³; В/Ц = 0,29	р = 2220 кг/м³; Коэфф.уплот. 0,91; Водопоглощение 8 %; Рсж = 26,3 МПа; Марка по морозостойкости F100	
129.	Цемент белый египетский 52,5 СЕМ (Ц) Известняк молотый, плотный, дробистостью Д1000 (И)	Бетон Ц = 700 кг/м³; И = 300 кг/м³; П = 700 кг/м³; ПЗ = 470 кг/м³; ГП = 7 кг/м³ (1%); В = 200 кг/м³	Бетон Стоимость компонентов 10 751 руб./м³	20/[41]
130.	Песок тонкозернистый известняковый, фракции 0,16-0,63 мм (П)	Ц = 400 кг/м³; И = 350 кг/м³; П = 620 кг/м³; ПЗ = 1040 кг/м³; ГП = 4 кг/м³ (1%); В = 163 кг/м³	Стоимость компонентов 6 855 руб./м³ <i>Оценивалась сравнительная стоимость компонентов бетонных смесей ПАПБ с гиперпластификатором Melfux c</i>	

№ сос тав а п/п	Виды сырья для композиционного вяжущего	Состав композиционного вяжущего/ бетона	Контролируемые параметры и физико-механические свойства композиционного вяжущего / бетона	Номер публикац ии/Ссылк а на источник
	Песок-заполнитель известняковый, фракции 0,63-2,5 (5,0) мм (ПЗ) Гиперпластификатор Melfux 5581 (ГП)		различным содержанием их в 1 м ³ бетона	
131.	Цемент белый египетский 52,5 СЕМ (Ц) Пигмент красный (ПК) Гиперпластификатор Melfux 5581 (ГП) Известняк молотый Суд. = 3700 см ² /г (И) Песок тонкозернистый известняковый, фракции 0,16- 0,63 мм (П) Песок-заполнитель известняковый, фракции 0,63-2,5 (5,0) мм (ПЗ)	Бетон Ц = 730 кг/м ³ ПК = 36 кг/м ³ (5% от Ц) ГП = 7 кг/м ³ (1% от Ц) И = 300 кг/м ³ П = 700 кг/м ³ ПЗ = 470 кг/м ³ В = 195 кг/м ³	Бетон Рсж = 144 МПа Риз = 19,7 МПа рвл 1сут. = 2454 кг/м ³ Куп = 0,993 Расплав конуса 28 см	21/[70]
132.	Гиперпластификатор Melfux (ГП) Пластификатор Melment (П) Суспензии микрокремнезема (СМ) Минеральные шлаковые и карбонатные порошки Эфиры целлюлозы Mecellose (СД) Известняковый наполнитель Суд. = 500 см ² /г (И)	Бетон СМ от 10 до 15% от массы цемента СД 0,1 % от массы цемента <i>Состав полностью не раскрыт</i>	Бетон При ГП = 0,4 % Рсж = 37 МПа Расплав конуса = 70 см При П = 0,425 % Рсж = 50,5 МПа Расплав конуса = 67 см	22/[42]
133.	Цемент белый египетский Aalborg I 52,5 N СЕМ (Ц) Фотолюминесцентный пигмент (ФП)	Бетон В/Ц = 0,42; ФП = 0 % от массы Ц	Бетон р = 2363 кг/м ³ ; Рсж = 55,3 МПа; Марка по морозостойкости F200	23/[43]
134.		В/Ц = 0,40; ФП = 5 % от массы Ц	р = 2363 кг/м ³ ; Рсж = 55,0 МПа; Марка по морозостойкости F200	
135.		В/Ц = 0,45; ФП = 10 % от массы Ц	р = 2360 кг/м ³ ; Рсж = 54,9 МПа; Марка по морозостойкости F200	
136.		В/Ц = 0,45; ФП = 15 % от массы Ц	р = 2350 кг/м ³ ; Рсж = 32,3 МПа; Марка по морозостойкости F100	
137.		В/Ц = 0,44; ФП = 20 % от массы Ц	р = 2364 кг/м ³ ; Рсж = 28,5 МПа; Марка по морозостойкости F100	
138.	Серый цемент марки ПЦ500ДО (СЦ) Речной песок асиновского месторождения Мк = 1,5-2,0 (П) Пигмент из железосодержащего шлама (ЖСШ) красный	Бетон В/Т = 0,2; Ц:П = 30:70	Бетон Рсжпропар. = 25,4 МПа; Рсж пропар.28 сут. = 28,2 МПа; Рсж н.т.28 сут. = 51,5 МПа; Цвет – серый	24/[55]
139.		В/Т = 0,2; Ц:П = 30:70; ЖСШ = 2%	Рсжпропар. = 26,4 МПа; Рсж пропар.28 сут. = 26,1 МПа; Рсж н.т.28 сут. = 52,8 МПа; Цвет – серо-розовый (бледный)	
140.		В/Т = 0,21; Ц:П = 30:70; ЖСШ = 3%	Рсжпропар. = 21,9 МПа; Рсж пропар.28 сут. = 26,6 МПа; Рсж н.т.28 сут. = 44,6 МПа; Цвет – серо-розовый	
141.		В/Т = 0,21; Ц:П = 30:70; ЖСШ = 4%	Рсжпропар. = 19,1 МПа; Рсж пропар.28 сут. = 31,2 МПа; Рсж н.т.28 сут. = 40,9 МПа; Цвет – светло-красный	
142.		В/Т = 0,22; Ц:П = 30:70; ЖСШ = 8%	Рсжпропар. = 17,6 МПа; Рсж пропар.28 сут. = 26,5 МПа; Рсж н.т.28 сут. = 33,1 МПа; Цвет – красный	
143.	Портландцемент белый ГОСТ 965-89 (ПЦ) Песок фракции 2,5-5мм (Люберецкий и Воронежский карьеры) (П) Пигмент Пластификатор С-3	Бетон В/Ц = 0,34; ПЦ = 469 кг/м ³ ; П = 1641 кг/м ³ ; В = 159 кг/м ³	Бетон ОК = 14 см; р = 2288 кг/м ³ ; Воздухововлечение = 4,5%4 Рсж. = 81,0 МПа	25/[47]
144.		В/Ц = 0,35; ПЦ = 471 кг/м ³ ; П = 1649 кг/м ³ ; В = 165 кг/м ³	ОК = 16 см; р = 2295 кг/м ³ ; Воздухововлечение = 5,6%; Рсж. = 84,0 МПа	
145.		В/Ц = 0,34; ПЦ = 468 кг/м ³ ; П = 1637 кг/м ³ ; В = 161 кг/м ³	ОК = 18 см; р = 2281 кг/м ³ ; Воздухововлечение = 5,8%; Рсж. = 84,4 МПа	
146.		В/Ц = 0,38; ПЦ = 466 кг/м ³ ; П = 1628 кг/м ³ ; В = 179 кг/м ³	ОК = 23 см; р = 2272 кг/м ³ ; Воздухововлечение = 5,8%; Рсж. = 84,4 МПа;	
147.		В/Ц = 0,37; ПЦ = 467 кг/м ³ ; П = 1632 кг/м ³ ; В = 174 кг/м ³	ОК = 21 см; р = 2275 кг/м ³ ; Воздухововлечение = 5,8%; Рсж. = 84,4 МПа	
148.	Портландцементный клинкер Твердый модификатор Наполнители (гипс и пигменты) Заполнители Функциональные добавки	–	Бетон Рсж. = 30,0 МПа Класс бетона 30В Морозостойкость 200 циклов Водопоглощение до 5%	26/[48]
149.	Портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н (ПЦ) Песок (П) Суперпластификатор «Реламикс» (СП) Золь нанокремнезема (ЗН) Микрокремнезем (М)	Бетон ПЦ = 24,7 мас.%; П = 65,3725 мас.%; СП = 0,2 мас.%; ЗН = 0,0025 мас.%; М = 1,3 мас.%; БС = 0,025 мас.%; В = 8,4 мас.%	Бетон Рсж = 30,9 МПа; Водопоглощение 2,4 %	27/[71]
150.		ПЦ = 18,65-22,93 мас.%; С-3 = 0,18 – 0,23 мас.%; ГП = 74,53 – 68,8 мас.%; НД = 0,005-0,02 мас.%	Рсж = 54,8 МПа; Водопоглощение 2,2 %	
151.		Ц = 22,12 мас.%; В = 5,76 мас.%; З = 0,345 мас.%; М = 1,991 мас.%; БС = 0,044 мас.%; Л = 3,384 мас.%; П = 66,36 мас.%	Подвижность смеси 12,4 см; Рсж = 82,3 МПа; Пористость = 4,3 %; Водопоглощение 2,1 %	

№ сос та в а п/п	Виды сырья для композиционного вяжущего	Состав композиционного вяжущего/ бетона	Контролируемые параметры и физико-механические свойства композиционного вяжущего / бетона	Номер публика ции/Ссылк а на источник
	Наномодифицирующая добавка, содержащая золь кремниевой кислоты (НД) Портландцемент общестроительный класса ЦЕМ I 52,5 Н (марки ПЦ 500-Д0-Н) (Ц) Природный речной кварцевый песок (П) Мк=2,65, рн=2,64 г/м3, рн=1,55 г/м3 Добавка ЛинамиксПК.(Л) Микрокремнезем - средним размером 0,1 мкм и удельной поверхностью 16-22 м2/г.(М) Золь нанокремнезема SiO2:SiO2 - 22,5%, ρ=1,14 г/см3. Минимальный размер составил 45 нм и средний размер 60 нм.(З) Белая сажа марки с массовой долей оксида кремния SiO2 не менее 76% (БС) .			
152.	Серый портландцемент стандарта EN197 – 1/2000 (Ц) Белый цемент Амман, Иордания (БЦ)	Бетон В/Ц = 0,45; Ц = 450 кг/м³; СИ = 850 кг/м³; КИ = 743 кг/м; В = 203 кг/м³; СП = 5,4 кг/м³	Бетон Рсж = 58,0 МПа; Расплав конуса от 68 до 70 см	28/[72]
153.	Смесь мелкого известняка и природного кварцевого песка (СИ)	В/Ц = 0,45; Ц = 405 кг/м³; БЦ = 45 кг/м; СИ = 850 кг/м³; КИ = 743 кг/м; В = 203 кг/м³; СП = 6 кг/м³	Рсж = 51,8 МПа; Расплав конуса от 68 до 70 см	
154.	Крупнозернистый известняк макс.фр. 19 мм (КИ)	В/Ц = 0,45; Ц = 383 кг/м³; БЦ = 67 кг/м; СИ = 850 кг/м³; КИ = 743 кг/м; В = 203 кг/м³; СП = 6,5 кг/м³	Рсж = 42,4 МПа; Расплав конуса от 68 до 70 см	
155.	ПоликарбонатовыйэфмrHRWR Structo–W450 (СП)	В/Ц = 0,45; Ц = 360 кг/м³; БЦ = 90 кг/м; СИ = 850 кг/м³; КИ = 743 кг/м; В = 203 кг/м³; СП = 7 кг/м³	Рсж = 41,8 МПа; Расплав конуса от 68 до 70 см	
156.		В/Ц = 0,45; Ц = 337 кг/м³; БЦ = 113 кг/м; СИ = 850 кг/м³; КИ = 743 кг/м; В = 203 кг/м³; СП = 11,25 кг/м³	Рсж = 39,5 МПа; Расплав конуса от 68 до 70 смОм-м	
157.	Белый портландцемент (БЦ) Молотый гранулированный доменной шлак (Ш)	Бетон В/Ц = 0,42; БЦ = 415 кг/м³; З = 706 кг/м³; БЗ = 1038 кг/м³; П = 0,33	Бетон Рсж = 47,2 МПа; Электрическое сопротивление = 107,8Ом-м	29/[73]
158.	Химический активатор Na2SO4 с 4%	В/Ц = 0,42; БЦ = 208 кг/м³; Ш = 208 кг/м³; З = 696 кг/м³; БЗ = 1042 кг/м³; П = 0,27	Рсж = 38,2 МПа; Электрическое сопротивление = 442,2Ом-м	
159.	связующим (50 ASW) Модифицированный карбоновый эфир (П) Мелкий заполнитель из речного песка (З) Крупный базальтовый заполнитель (БЗ)	В/Ц = 0,42; БЦ = 125 кг/м³; Ш = 292 кг/м³; З = 693 кг/м³; БЗ = 1043 кг/м³; П = 0,29	Рсж = 48,4 МПа; Электрическое сопротивление = 782,5Ом-м	
160.	Белый портландцемент типа ВРИ42,5 (БЦ) Известняковый дробленый наполнитель (И)	Бетон БЦ = 500 кг/м³; СП = 8,9 кг/м³; В = 155 кг/м³; К1 = 800 кг/м³; К2 = 100 кг/м³; П1 = 400 кг/м³; П2 = 400 кг/м³	Бетон Расплав конуса 720 мм; Рсж = 72,6 МПа	30/[53]
161.	Микрокремнезем (М) Крупный заполнитель двух фракций (К1 и К20)	БЦ = 476 кг/м³; И = 24 кг/м³; СП = 8,5кг/м³; В = 158кг/м³; К1 = 800 кг/м³; К2 = 100 кг/м³; П1 = 395кг/м³; П2 = 395 кг/м³	Расплав конуса 700 мм; Рсж = 70,3 МПа	
162.	Природный кремнеземистый песок (П1 и П2) двух разных фракций	БЦ = 416 кг/м³; И = 84 кг/м³; СП = 7,4 кг/м³; В = 161 кг/м³; К1 = 800 кг/м³; К2 = 95 кг/м³; П1 = 390 кг/м³; П2 = 390 кг/м³	Расплав конуса 690 мм;Рсж = 66,9 МПа	
163.	Суперпластификаторполикарбок силатного типа (СП)	БЦ = 476 кг/м³; М = 24 кг/м³; СП = 12,5 кг/м³; В = 175 кг/м³; К1 = 800 кг/м³; К2 = 76 кг/м³; П1 = 375 кг/м³; П2 = 375 кг/м³	Расплав конуса 710 мм; Рсж = 81,4 МПа	
3. Состав и свойства композиционных вяжущих, применение которых возможно для производства тонкостенных изделий				
164.	“Лежалый” фосфогипс (Ф) Негашеная известь СаО (И) Песок Базарно-Карабулакского месторождения с низким модулем крупности Мкр= 1,13, с насыпной плотностью 1310 кг/м³, содержанием глинистых частиц 0,9 % (П) Жидкое натриевое стекло использовали как модифицирующую добавку (ЖС) Базальтовое волокно с диаметром нити 9–17 мкм	Вяжущее Ф к И = 2:1; П 10%; В 2:1	Вяжущее Рсж = 13,2 МПа; Риз = 3,0 МПа	31/[74]
165.		Ф к И = 2:1;П 10%; В 2:1; ЖС 10%	Рсж = 19,6 МПа; Риз = 2,9 МПа	
166.		Ф к И = 2:1; П 10%; В 2:1; ЖС 5%; БВ 1%	Рсж = 16,4 МПа; Риз = 2,9 МПа	

№ сос тав а п/п	Виды сырья для композиционного вяжущего	Состав композиционного вяжущего/ бетона	Контролируемые параметры и физико-механические свойства композиционного вяжущего / бетона	Номер публикац ии/Ссылк а на источник
	плотностью 2800–3000 кг/м ³ , Рраст. 2600–3200 МПа. (БВ)			
167.	Портландцемент серый и белый (ПЦс и ПЦб) Мел (М) Отсев дробления квадропесчанника (КВП) Суперпластификатор (СП)	Вязущее ПЦс = 80%; КВП = 20% ; В/Ц = 0,37	Вязущее Проводился подбор оптимальной дозировки пластификатора СП = 0,58%; Расплав конуса = 170 мм	32/[65]
168.		ПЦб = 80% ;КВП = 20% ; В/Ц = 0,37	СП = 0,65%; Расплав конуса = 160 мм	
169.		ПЦс = 80%; М = 20%; В/Ц = 0,37	СП = 0,80%;Расплав конуса = 180 мм	
170.		ПЦб = 80%; М = 20%; В/Ц = 0,37	СП = 0,82%; Расплав конуса = 187 мм	
171.		ПЦс = 60%; КВП = 40%; В/Ц = 0,37	СП = 0,48%; Расплав конуса = 145 мм	
172.		ПЦс = 60%; КВП = 20%; М = 20%; В/Ц = 0,37	СП = 0,62%; Расплав конуса = 182 мм	
173.		ПЦб = 60%; КВП = 20%; М = 20%; В/Ц = 0,37	СП = 0,80%; Расплав конуса = 185 мм	
174.		ПЦб = 60%; М = 40%; В/Ц = 0,37	СП = 0,60%; Расплав конуса = 175 мм	
175.	Белый клинкер ОАО «Щуровский цемент» (Ц) Суперпластификатор нафталинового ряда С-3	Вязущее В/Ц = 0,24; С-3 = 2%; Рецептура портландцементов цветных (ППЦ) – Желудь.Коричневый	Вязущее Проход через сито №008 = 99,0 %; Расплав стандартного конуса 112 мм; Удельная поверхность 630 м²/кг ПСХ-2; Н.Г. = 17,0%; Сроки схватывания, час-минута начало 0-30, конец 0-45 Рсж28 = 51,0 МПа; Риз28 = 6,54 МПа	33/[57] 34/[58] 35/[59]
176.		В/Ц = 0,24; С-3 = 2%; Рецептура портландцементов цветных (ППЦ) – Гладиолус. Красно-терракотовый	Проход через сито №008 = 99,6 %; Расплав стандартного конуса 108 мм; Удельная поверхность 404 м²/кг ПСХ-2; Н.Г. = 17,5%; Сроки схватывания, час-минута начало 0-30, конец 0-45 Рсж28 = 54,0 МПа; Риз28 = 6,66 МПа	
177.		В/Ц = 0,25; С-3 = 2%; Рецептура портландцементов цветных (ППЦ) – Чайная роза. Ярро-красный	Проход через сито №008 = 100,0 %; Расплав стандартного конуса 115 мм; Удельная поверхность 689 м²/кг ПСХ-2; Н.Г. = 17,0%; Сроки схватывания, час-минута начало 0-30, конец 0-45 Рсж28 = 51,4 МПа; Риз28 = 6,57 МПа	
178.		В/Ц = 0,24; С-3 = 2%; Рецептура портландцементов цветных (ППЦ) – Георгин.Красный	Проход через сито №008 = 99,2 %; Расплав стандартного конуса 109 мм; Удельная поверхность 480 м²/кг ПСХ-2; Н.Г. = 17,0%; Сроки схватывания, час-минута начало 0-30, конец 0-45 Рсж28 = 52,2 МПа; Риз28 = 8,80 МПа	
179.		В/Ц = 0,25; С-3 = 2%; Рецептура портландцементов цветных (ППЦ) – Подсолнух. Охристо-желтый	Проход через сито №008 = 99,6 %; Расплав стандартного конуса 107 мм; Удельная поверхность 667 м²/кг ПСХ-2; Н.Г. = 18,5%; Сроки схватывания, час-минута начало 0-30, конец 0-45 Рсж28 = 50,7 МПа; Риз28 = 6,52 МПа	
180.		В/Ц = 0,24; С-3 = 2%; Рецептура портландцементов цветных (ППЦ) – Золотые шары. Желтый	Проход через сито №008 = 98,7 %; Расплав стандартного конуса 115 мм; Удельная поверхность 653 м²/кг ПСХ-2; Н.Г. = 17,0%; Сроки схватывания, час-минута начало 0-30, конец 0-45 Рсж28 = 51,0 МПа; Риз28 = 8,03 МПа	
181.		В/Ц = 0,23; С-3 = 2%; ППЦ– Зеленый сад. Темно-зеленый	Проход через сито №008 = 100,0 % ; Расплав стандартного конуса 114 мм Удельная поверхность 679 м²/кг ПСХ-2; Н.Г. = 17,0% Сроки схватывания, час-минута начало 0-35, конец 0-55 Рсж28 = 51,9 МПа; Риз28 = 6,57 МПа	
182.		В/Ц = 0,23; С-3 = 2%; ППЦ– Весенняя листва. Ярро-зеленый	Проход через сито №008 = 100,0 %; Расплав стандартного конуса 115 мм; Удельная поверхность 763 м²/кг ПСХ-2; Н.Г. = 17,0%; Сроки схватывания, час-минута начало 0-30, конец 0-45 Рсж28 = 50,8 МПа; Риз28 = 9,21 МПа	
183.		В/Ц = 0,23; С-3 = 2%; ППЦ– Фиروزа. Бирюзовый	Проход через сито №008 = 98,0 %; Расплав стандартного конуса 115 мм; Удельная поверхность 478 м²/кг ПСХ-2; Н.Г. = 17,0%; Сроки схватывания, час-минута начало 0-30, конец 0-45 Рсж28 = 54,1 МПа; Риз28 = 8,68 МПа	
184.		В/Ц = 0,24; С-3 = 2%; ППЦ– Василек. Ярро-голубой	Проход через сито №008 = 98,0 %; Расплав стандартного конуса 115 мм; Удельная поверхность 489 м²/кг ПСХ-2; Н.Г. = 17,5%; Сроки схватывания, час-минута начало 0-30, конец 0-45 Рсж28 = 52,0 МПа; Риз28 = 6,96 МПа	
185.		В/Ц = 0,25; С-3 = 2%; ППЦ– Сирень махровая. Фиолетовый.	Проход через сито №008 = 99,8 %; Расплав стандартного конуса 115 мм; Удельная поверхность 610 м²/кг ПСХ-2; Н.Г. = 17,0% Сроки схватывания, час-минута начало 0-30, конец 0-45 Рсж28 = 50,8 МПа; Риз28 = 6,53 МПа	

№ сос тав а п/п	Виды сырья для композиционного вяжущего	Состав композиционного вяжущего/ бетона	Контролируемые параметры и физико-механические свойства композиционного вяжущего / бетона	Номер публикац ии/Ссылк а на источник
186.		В/Ц = 0,24; С-3 = 2%; ППЦ– Черная ночь. Черный	Проход через сито №008 = 99,0 %; Расплав стандартного конуса 110 мм; Удельная поверхность 645 м²/кг ПСХ-2; Н.Г. = 17,5%; Сроки схватывания, час-минута начало 0-35, конец 0- 55 Рсж28 = 52,5 МПа; Риз28 = 6,6 МПа	
187.		В/Ц = 0,24; С-3 = 2%; ППЦ– Хризантема. Белый окрашенный	Проход через сито №008 = 99,2 %; Расплав стандартного конуса 110 мм; Удельная поверхность 480 м²/кг ПСХ-2; Н.Г. = 17,5%; Сроки схватывания, час-минута начало 0-35, конец 0- 55 Рсж28 = 56,1 МПа; Риз28 = 9,58 МПа	
188.	Белый цемент ТХ Millenium (БЦ) Белый метаксаолин (со специальным компатибилизирующим агентом) (БМ) Дробленый мрамор d20 мм (ДМ) Акриловый суперпластификатор – раствор 30%, сухой экстракт (СП)	Вяжущее БЦ = 380 кг/м³ БМ = 38,7 кг/м³ ДМ = 1850 кг/м³ СП = 10,5 кг/м³ В = 160 л/м³	Вяжущее Рсж = 86,2 МПа Риз = 10,4 МПа Косвенная прочность на растяжение = 7,0 МПа Един = 44,6 Гпа Естат = 41,0 Гпа	36/[49]
189.	Белый портландцемент (БЦ)	Вяжущее БЦ = 117,6 кг/м³; Д20 = 68,7 кг/м³; Д40 = 386,6 кг/м³; Д80 = 106,4 кг/м³; В = 319,0 кг/м³	Вяжущее Изменение цвета растворов после 41 месяца испытаний (после промывки) Различие яркости цвета в начале экспозиции и через 41 месяц ΔL = значимое различие в восприятии цвета к восприятию яркости Различие насыщенности цвета в начале экспозиции и через 41 месяц Δa = существенных различий в восприятии цвета к насыщенности не отмечается	37/[50]
190.	Доломит №20 (Д20) Доломит №40 (Д40) Доломит №80 (Д80) Добавка n-TiO₂ (Д)		ΔL = менее значимое различие в восприятии цвета к восприятию яркости Δa = существенных различий в восприятии цвета к насыщенности не отмечается	
191.		БЦ = 116,1 кг/м³; Д20 = 67,9 кг/м³; Д40 = 381,8 кг/м³; Д80 = 105,0 кг/м³; В = 322,1 кг/м³; Д = 1% = 5,4 кг/м³	ΔL = существенное различие в восприятии цвета к восприятию яркости Δa = существенных различий в восприятии цвета к насыщенности не отмечается	
192.		БЦ = 106,9 кг/м³; Д20 = 62,5 кг/м³; Д40 = 351,5 кг/м³; Д80 = 96,7 кг/м³; В = 355,9 кг/м³; Д = 5% = 25,0 кг/м³	ΔL = существенное различие в восприятии цвета к восприятию яркости Δa = существенных различий в восприятии цвета к насыщенности не отмечается	
193.		БЦ = 99,2 кг/м³; Д20 = 58,0 кг/м³; Д40 = 326,1 кг/м³; Д80 = 89,7 кг/м³; В = 379,2 кг/м³; Д = 10% = 46,3 кг/м³	ΔL = существенное различие в восприятии цвета к восприятию яркости Δa = существенных различий в восприятии цвета к насыщенности не отмечается	
194.	Белый цемент I 52,5 R (БЦ) Песок фракции 0,1 мм (П) Микрокремнезем (М) Волокна Поливинилового спирта тонкого и среднего помола (ПСт и ПСс) Суперпластификатор (СП)	Вяжущее В/Ц = 0,25; БЦ = 850 кг/м³; П = 1150 кг/м³; М = 140 кг/м³; ПСт = 2 кг/м³; ПСс = 3 кг/м³; В = 210 кг/м³; СП = 20 кг/м³	Вяжущее Механические и физические свойства бетонных композиций определяли в возрасте 50 суток: Рсж = 133,0 МПа; Морозостойкость = 500 циклов; Поверхностное поглощение = 3,4 г/дм²	38/[75]
195.	Доменной шлак (ДШ) Гипс (Г) Отходы обогащения (О)	Вяжущее ДШ = 28 мас. %; Г = 4 мас. %; О = 12 мас. %; Ш = 56 мас. %	Вяжущее Рсж = 61,1 МПа; Риз = 11,0 МПа; Морозостойкость 350 циклов	39/[44]
196.	Шлак от выплавки феррохрома (Ш)	ДШ = 35 мас. %; Г = 3 мас. %; О = 8 мас. %; Ш = 56 мас. %	Рсж = 72,1 МПа; Риз = 12,0 МПа; Морозостойкость 360 циклов	
197.		ДШ = 39 мас. %; Г = 5 мас. %; О = 5 мас. %; Ш = 51 мас. %	Рсж = 72,1 МПа; Риз = 12,3 МПа; Морозостойкость 360 циклов	
198.		ДШ = 3 мас. %; Г = 4 мас. %; О = 12 мас. %; Ш = 51 мас. %	Рсж = 58,3 МПа; Риз = 8,0 МПа; Морозостойкость 300 циклов	
199.		ДШ = 33 мас. %; Г = 4 мас. %; О = 12 мас. %; Ш = 51 мас. %	Рсж = 62,0 МПа; Риз = 8,1 МПа; Морозостойкость 330 циклов	
200.		ДШ = 33 мас. %; Г = 4 мас. %; О = 12 мас. %; Ш = 51 мас. %	Рсж = 60,0 МПа; Риз = 8,1 МПа; Морозостойкость 340 циклов	
201.		ДШ = 39 мас. %; Г = 4 мас. %; О = 8 мас. %; Ш = 49 мас. %	Рсж = 43,9 МПа; Риз = 7,7 МПа; Морозостойкость 280 циклов	
202.	Цемент М-400 (Ц) Красный железо-окислый пигмент (КЖО) Синий фталоциановый (СФ)	Вяжущее Ц = 90 мас. %; Пигмент/кол-во = КЖО/10; Режим обработки в виброцентробежной мельнице: g = 15; Заполнение шарами = 50%; Время помола 2 мин.	Вяжущее Суд = 7800 см²/кг; Рсж = 480 МПа; Повышение интенсивности цвета по отношению к смешанным цементам 125 %	40/[60]
203.		Ц = 90 мас. %; Пигмент/кол-во = КЖО/10; Режим обработки в виброцентробежной мельнице: g = 35; Заполнение шарами = 50%; Время помола 2 мин.	Суд = 8700 см²/кг; Рсж = 490 МПа; Повышение интенсивности цвета по отношению к смешанным цементам 135 %	
204.		Ц = 90 мас. %; Пигмент/кол-во = КЖО/10; Режим обработки в виброцентробежной мельнице: g = 40; Заполнение шарами = 65%; Время помола 3 мин.	Суд = 9800 см²/кг; Рсж = 475 МПа; Повышение интенсивности цвета по отношению к смешанным цементам 145 %	

№ сос тав а п/п	Виды сырья для композиционного вяжущего	Состав композиционного вяжущего/ бетона	Контролируемые параметры и физико-механические свойства композиционного вяжущего / бетона	Номер публикац ии/Ссылк а на источник
205.		Ц = 90 мас.%; Пигмент/кол-во = КЖО/10; Режим обработки в виброцентробежной мельнице: g = 50; Заполнение шарами = 75%; Время помола 4 мин.	Суд = 10800 см ² /кг; Rсж = 480 МПа; Повышение интенсивности цвета по отношению к смешаным цементам 155 %	

**Полужирным начертанием выделены составы, указанные в публикациях как оптимальные.*

**Титульный лист технологического регламента
на производство полифункционального композиционного материала
на основе вспученного перлитового песка**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Г. ШУХОВА**



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной
и инновационной деятельности

Т.М. Давыденко

«12» декабря 2023 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

на производство полифункционального композиционного материала
на основе вспученного перлитового песка

СОГЛАСОВАНО

Генеральный директор
ООО «Селена»

А.А. Гонтарев

«12» 12 2023 г.



РАЗРАБОТАНО

Д-р техн. наук, профессор

В.В. Строкова

«11» декабря 2023 г.

Канд. техн. наук

Е.Н. Губарева

«11» декабря 2023 г.

Канд. техн. наук

М.В. Антоненко

«11» декабря 2023 г.

Мл. науч. сотр.

Н.О. Хмара

«11» декабря 2023 г.

Белгород 2023 г.

Акт выпуска опытной партии полифункционального композиционного материала



Общество с ограниченной
ответственностью «Селена»
ул. Ржевское шоссе, 25,
г. Шебекино, Белгородская обл.,
Россия, 309296

Tel.: +7 (47248) 2-34-63;
+7 (47248) 2-21-29

Selena limited
Liability Company
st. Rzhenskoye shosse, 25,
Shebekino town, Belgorod region,
Russia, 309296

info@npselena.ru;
npselena.ru

АКТ
выпуска опытной партии
полифункционального композиционного материала
на основе вспученного перлитового песка

г. Шебекино

«24» января 2024 г.

Комиссия в составе: **представители от ООО «Селена»:**

генеральный директор А.А. Гонтарев

представители от БГТУ им. В.Г. Шухова

д-р техн. наук, профессор В.В. Строкова,

канд. техн. наук Е.Н. Губарева,

канд. техн. наук М.В. Антоненко,

мл. науч. сотр. Н.О. Хмара

участвовала в выпуске опытных партий полифункционального композиционного материала (ПКМ) состава «вспученный перлитовый песок – наноразмерный анатаз» на действующей технологической линии.

Полученные ПКМ обладают фотокаталитической и пуццоланической активностью, и представляют практический интерес для предприятия. Разработанные составы приняты к внедрению, продукция будет производиться при наличии соответствующих заказов со стороны потребителей.

ООО «Селена»



А.А. Гонтарев

БГТУ им. В.Г. Шухова

В.В. Строкова

Е.Н. Губарева

М.В. Антоненко

Н.О. Хмара

**Титульный лист стандарта организации
на самоочищающийся мелкозернистый бетон на основе белого портландцемента
для тонкостенных изделий**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА**
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СОГЛАСОВАНО:

Проректор по научной и
инновационной деятельности

д-р пед. наук, профессор

Т.М. Давыденко

«07» 06 20 24 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор БГТУ им. В.Г. Шухова,

д-р экон. наук, профессор

С.Н. Глаголев

«06» 06 20 24 г.



**САМООЧИЩАЮЩИЙСЯ МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН
НА ОСНОВЕ БЕЛОГО ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА
ДЛЯ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

**Технические условия
СТО 02066339-078-2024**

РАЗРАБОТАН:

д-р техн. наук, проф.

В.В. Строкова

«04» 06 20 24 г.

канд. техн. наук

Е.Н. Губарева

«05» 06 20 24 г.

канд. техн. наук

М.В. Антоненко

«05» 06 20 24 г.

мл. науч. сотр.

Н.О. Хмара

«05» 06 20 24 г.

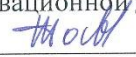
Белгород 20 24 г.

**Титульный лист технологического регламента
на изготовление самоочищающегося мелкозернистого бетона
на основе белого портландцемента для тонкостенных изделий**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Г. ШУХОВА**

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по научной
и инновационной деятельности
 Т.М. Давыденко
« 02 » июля 2024 г.

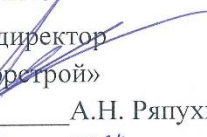
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

на изготовление самоочищающегося мелкозернистого бетона на основе
белого портландцемента для тонкостенных изделий

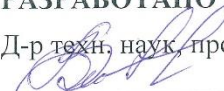
СОГЛАСОВАНО

Генеральный директор
ООО «Мостдорстрой»



 А.Н. Ряпухин
« 02 » июля 2024 г.

РАЗРАБОТАНО

Д-р техн. наук, профессор
 В.В. Строкова

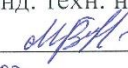
« 02 » июля 2024 г.

Канд. техн. наук

 Е.Н. Губарева

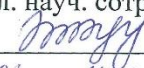
« 02 » июля 2024 г.

Канд. техн. наук

 М.В. Антоненко

« 02 » июля 2024 г.

Мл. науч. сотр.

 Н.О. Хмара

« 02 » июля 2024 г.

Белгород 2024 г.

Акт выпуска опытной партии самоочищающихся фасадных панелей из мелкозернистого бетона на основе белого цемента

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«Мостдорстрой»

308009, г. Белгород, ул. Разуменская, д. 12;
тел.: (4722) 24-86-20-приёмная; 24-86-23-бухгалтерия; 24-86-21-ПТО
oostmostdorstroy@mail.ru
ОГРН 1063123078534, ИНН 3123133373, КПП 312301001
АО УКБ «БЕЛГОРОДСОЦБАНК» г. Белгород
р/с 40702810700010104195; к/с 30101810100000000701; БИК 041403701

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор
ООО «Мостдорстрой»

А.Н. Ряпухин
«12» сентября 2024 г.

АКТ

выпуска опытной партии самоочищающихся фасадных панелей
из мелкозернистого бетона на основе белого цемента

г. Белгород

«12» сентября 2024 г.

Комиссия в составе: представители от ООО «Мостдорстрой»

главный инженер А.В.Сиухин

представители от БГТУ им. В.Г. Шухова

д-р техн. наук, профессор В.В. Строкова,

канд. техн. наук Е.Н. Губарева,

канд. техн. наук М.В. Антоненко,

мл. науч. сотр. Н.О. Хмара

участвовала в выпуске опытной партии самоочищающихся фасадных панелей из мелкозернистого бетона на основе белого цемента с использованием полифункционального композиционного материала системы «вспученный перлитовый песок – наноразмерный анатаз», на действующей линии по производству бетонных изделий.

Представители от ООО «Мостдорстрой»

Главный инженер

Представители от БГТУ им. В.Г. Шухова

Д-р техн. наук, профессор

Канд. техн. наук

Канд. техн. наук

Мл. науч. сотр.

А.В. Сиухин

В.В. Строкова

Е.Н. Губарева

М.В. Антоненко

Н.О. Хмара

Справка о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по цифровой
трансформации и образовательной
деятельности БГТУ им. В.Г. Шухова,
канд. техн. наук, доцент

В.М. Поляков

«08» января 2025 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

Теоретические положения, результаты экспериментальных исследований и промышленной апробации, полученные при выполнении диссертационной работы Н.О. Хмара «Мелкозернистый бетон на основе белого цемента для самоочищающихся тонкостенных изделий», используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлениям 08.03.01 Строительство, профили «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», «Экспертиза и технологии перспективных материалов» и 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов, профиль «Материаловедение и технологии конструкционных и специальных материалов»; магистров направлений 08.04.01 Строительство, профили «Производство строительных материалов, изделий и конструкций: наносистемы в строительном материаловедении», «Эффективные композиты для зеленого строительства» и 28.04.03 Наноматериалы, профиль «Наноструктурированные композиты строительного и специального назначения», что отражено в рабочих программах дисциплин «Технология бетона, строительных изделий и конструкций», «Композиционные вяжущие вещества для перспективных материалов», «Композиционные материалы конструкционного и специального назначения», «Технология получения наноструктурированных композитов строительного и специального назначения», «Технология эффективных композитов для зеленого строительства», «Материаловедение и технология наноструктурированных конструкционных и специальных материалов».

Зав. кафедрой строительного материаловедения,
изделий и конструкций,
д-р техн. наук, профессор

В.С. Лесовик

Зам. зав. кафедрой материаловедения
и технологии материалов,
д-р техн. наук, профессор

Л.Н. Боцман