

**БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В. Г. ШУХОВА**

**На правах рукописи**



**СТОЛЕТОВА ИРИНА АЛЕКСАНДРОВНА**

**МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БЕТОНЫ  
НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ С МИНЕРАЛЬНОЙ  
ДОБАВКОЙ ВЫВЕТРЕННЫХ КВАРЦИТОПЕСЧАНИКОВ  
ДЛЯ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ**

**2.1.5 Строительные материалы и изделия**

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

**Научный консультант:  
доктор технических наук, профессор,  
член-корр. РААСН  
Лесовик В. С.**

**Белгород 2025**

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА</b> .....	13
1.1 Малые архитектурные формы как элемент формирования градостроительной среды.....	15
1.2 Опыт применения мелкозернистого бетона в современном строительстве.....	18
1.3 Особенности проектирования мелкозернистых бетонов.....	25
1.4 Специфика технологии производства мелкозернистого бетона.....	34
1.5 Выводы.....	39
<b>ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ</b> .....	41
2.1 Методы исследований.....	41
2.2 Характеристика использованных материалов.....	47
2.3 Выводы.....	52
<b>ГЛАВА 3. КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЯЖУЩИЕ ДЛЯ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫВЕТРЕННЫХ КВАРЦИТОПЕСЧАНИКОВ</b> .....	54
3.1 Свойства выветренных кварцитопесчаников Лебединского горно-обогатительного комбината как компонента вяжущих систем .....	55
3.2 Изучение особенностей гранулометрического состава молотых кварцитопесчаников и свойств композиционных вяжущих на их основе..	62
3.3 Анализ особенностей процессов фазо-и структурообразования при	

гидратации и твердении композиционного вяжущего.....	69
3.4 Свойства вяжущих в зависимости от технологии производства минеральной добавки.....	72
3.5 Выводы.....	82
<b>ГЛАВА 4. СОСТАВ И СВОЙСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА .....</b>	<b>84</b>
4.1 Мелкозернистые самоуплотняющиеся бетоны для малых архитектурных форм.....	85
4.2 Мелкозернистые самоуплотняющиеся фибробетоны для получения ограждающих конструкций.....	101
4.3 Мелкозернистые бетоны на композиционном вяжущем для 3D-аддитивных технологий.....	104
4.3.1 Свойства мелкозернистых бетонов для 3D-аддитивных технологий в зависимости от состава.....	105
4.3.2 Формуемость и послойная укладка как важный этап 3D-печати.....	112
4.4 Выводы.....	115
<b>ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>118</b>
5.1 Разработка моделей из мелкозернистого бетона для малых архитектурных форм в соответствии с концепцией проекта «Белый квартал».....	118
5.2 Техничко-экономические показатели на производство мелкозернистого бетона для малых архитектурных форм.....	122
5.3 Внедрение результатов работы.....	127
5.4 Выводы .....	128

<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	130
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	133
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	151
.	
Приложение А. Акт производства стелы из бетона на основе композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника.....	152
Приложение Б. Титульный лист технических условий бетона на основе композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника.....	153
Приложение В. Титульный лист технологического регламента на производство бетона на основе композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника для 3D-аддитивного производства.....	154
Приложение Г. Протокол о внедрении с ООО «КЕЙКОД» при изготовлении стелы на территории «Борисовская керамика» в п. г. т. Борисовка Белгородской области.....	155
.Приложение Д. Протокол о внедрении с ООО «КЕЙКОД» при изготовлении композиции скалы «Истоки» в Екатеринбурге.....	156
Приложение Е. Протокол о внедрении с ООО «КЕЙКОД» при изготовлении МАФ.....	157
Приложение Ж. Протокол о намерениях с геологическим факультетом МГУ им. М. В. Ломоносова.....	158
Приложение И. Протокол о намерениях с компанией XINSHUN (Китай)..	159
Приложение К. Протокол о намерениях с компанией AL-ETIHAD	

READY MIXED CONCRETE (Саудовская Аравия).....	160
Приложение Л. Протокол о намерениях с Генеральной подрядной компанией «Аль-Карнас» (Ирак).....	161
Приложение М. Справка о внедрении теоретических положений в учебном процессе при подготовке студентов бакалавриата.....	162
Приложение Н. Справка о внедрении теоретических положений в учебном процессе при подготовке студентов магистратуры.....	163

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Мелкозернистые бетоны в современной строительной индустрии широко применяются для изготовления малых архитектурных форм (МАФ). Это связано с сочетанием функциональности, эстетичности и экономической эффективности данного вида бетонов.

Отличительные свойства мелкозернистого бетона, такие как удобоукладываемость, заполняющая способность и сопротивление сегрегации, позволяют создавать архитектурные изделия сложной геометрии с возможностью эксплуатации на открытом воздухе.

Передовыми способами получения сложных декоративно-функциональных архитектурных объектов являются аддитивные и литьевые технологии, которые, для эффективной практической реализации, требуют разработки бетонов нового уровня.

В этой связи, актуальным является повышение эффективности мелкозернистых бетонов для современных методов производства изделий за счёт использования композиционных вяжущих (КВ) на сырье, подготовленном геологическими процессами, таком как выветренные кварцитопесчаники (ВКВП) Курской магнитной аномалии (КМА).

Работа выполнялась при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00866).

**Степень разработанности темы.** Решению проблемы комплексного использования нерудного сырья КМА посвящены многие исследования, но, при утверждении запасов попутнодобываемых пород в государственной комиссии по запасам, ВКВП не вошли в число полезных ископаемых. При этом известны сведения о том, что породы разных стадий выветривания и зеленосланцевой степени метаморфизма требуют меньшей энергии для разрушения, а поверхность частиц имеет большее количество активных центров для взаимодействия с минералами цементного клинкера. Изучение возможности применения подобных пород как минеральной добавки для бетонов ранее не проводилось.

**Цель работы.** Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение мелкозернистых бетонов для МАФ с улучшенными свойствами за счёт применения ВКВП в качестве компонента КВ.

Для достижения поставленных целей решались **следующие задачи:**

- на основе исследования минерального состава и физико-механических характеристик оценить перспективность использования ВКВП в качестве активного компонента в КВ;
- исследование влияния ВКВП на процессы структурообразования КВ;
- разработка КВ для получения широкой номенклатуры мелкозернистых бетонов;
- разработка рецептур и технологии приготовления мелкозернистых бетонов на основе КВ с использованием ВКВП для получения изделий различного назначения;
- подготовка нормативных документов для реализации теоретических и экспериментальных исследований и промышленной апробации.

**Научная новизна.** Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение КВ с требуемыми эксплуатационными характеристиками для мелкозернистых бетонов, способствующее повышению прочностных показателей при снижении доли цемента. Использование минеральной добавки из подготовленного геологическими процессами ВКВП, предварительно молотого в вибромельнице с последующим смешением полученного порошка с цементом (ПЦ) в соотношении (по массе) ВКВП:ПЦ равном 1:4 приводит к повышению активности КВ с использованием ВКВП на 13% по сравнению с ПЦ. При увеличении удельной поверхности ВКВП до значений  $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$  и соотношении (по массе) ВКВП:ПЦ равном 1:9 показатели активности КВ с использованием ВКВП повышаются на 19% по сравнению с ПЦ. Применение КВ с минеральной добавкой ВКВП позволит получить широкую номенклатуру мелкозернистых бетонов для МАФ: самоуплотняющийся бетон на белом цементе ПЦБ 1-500-ДО (9% ВКВП), самоуплотняющийся фибробетон на

портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н (9% ВКВП), бетон для 3D-аддитивного производства на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н (20% ВКВП).

Установлен характер влияния минеральных добавок ВКВП (9% и 20%) на свойства смеси и процессы структурообразования мелкозернистых бетонов. Установлена зависимость активности КВ с минеральной добавкой тонкомолотого ВКВП от удельной поверхности и расхода данной добавки. При  $S_{уд}=500$  м<sup>2</sup>/кг расход ВКВП составляет 20%; при  $S_{уд}=1000$  м<sup>2</sup>/кг расход ВКВП - 9%. Введение минеральной добавки ВКВП обеспечивает уплотнение микроструктуры цементной матрицы и макроструктуры композита при экономии цемента, что позволяет получить визуально привлекательные МАФ для улучшения качества архитектурно-градостроительной среды. Данные факты объясняются процессами дополнительного структурообразования за счет связывания выделяющейся при гидратации клинкерных минералов СаО аморфным кремнеземом, присутствующим в ВКВП, и синтеза гидросиликатов кальция второй генерации.

Предложена феноменологическая модель структурообразования мелкозернистых бетонов на основе КВ с минеральной добавкой ВКВП, обусловленная формирующейся уплотненной структурой и повышенной адгезией цементной матрицы мелкозернистого бетона с минеральной добавкой ВКВП, на развитой поверхности которой формируются тонкие пленки гидратных фаз, взаимодействие с которыми приводит к упрочению контактной зоны между минеральной добавкой и цементным камнем.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Дополнены теоретические представления об энергосберегающих технологических процессах и методах создания мелкозернистых бетонов; управлении процессами структурообразования при использовании КВ с минеральной добавкой горных пород, подготовленных геологическими процессами, и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника (КВП) зеленосланцевой степени метаморфизма, позволяющие получать мелкозернистые бетоны с высокими эксплуатационными характеристиками.

Разработана технология получения КВ с показателями активности 62,1-69 МПа при замене 20% и 9% цемента на минеральную добавку ВКВП, полученную путем помола в вибромельнице.

Предложены составы смесей для получения самоуплотняющегося мелкозернистого бетона для МАФ при использовании КВ с минеральной добавкой ВКВП:

- мелкозернистый бетон на белом цементе ПЦБ 1-500-ДО с минеральной добавкой ВКВП (9%) и мела (7%) со следующими показателями: класс В30, марка по морозостойкости F150;

- мелкозернистый фибробетон на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н с минеральной добавкой ВКВП (9%) и стеклофибры (3%) со следующими показателями: класс В35, марка по морозостойкости F200.

Разработан состав смеси для получения мелкозернистого бетона для 3D-аддитивного производства на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н с минеральной добавкой ВКВП (20%) и мелкого заполнителя из отсева дробления КВП зеленосланцевой степени метаморфизма со следующими показателями: класс В30, марка по морозостойкости не менее F100.

На основании выполненных исследований показана возможность использования подготовленных геологическими процессами ВКВП в качестве сырья для производства строительных композитов.

**Методология работы и методы исследований.** Методология работы основывается на трудах отечественных и зарубежных исследователей по тематике, связанной с получением КВ и изделий на их основе. При выполнении исследований применялось современное высокотехнологичное оборудование, методы исследований и испытаний, регламентированные отечественными и зарубежными нормативными документами, методы математического планирования эксперимента и обработки его результатов. Экспериментальные исследования и оценка свойств исходных материалов, КВ и бетонов на их основе, осуществлялись методами электронной микроскопии, качественного и количественного рентгенофазового анализа, методом воздухопроницаемости

при определении удельной поверхности, методами определения усадки и реотехнологических характеристик, физико-механических методов испытаний строительных материалов. Для определения растекаемости смесей были проведены измерения диаметра расплыва конуса по Суттарду.

**Положения, выносимые на защиту:**

- технологическое решение, обеспечивающее получение КВ с требуемыми эксплуатационными характеристиками для мелкозернистых бетонов;
- характер влияния минеральных добавок ВКВП на свойства смеси и процессы структурообразования мелкозернистых бетонов;
- феноменологическая модель структурообразования мелкозернистых бетонов на основе КВ с минеральной добавкой ВКВП;
- технология получения КВ с использованием в качестве минеральной добавки ВКВП, полученного путем помола в вибромельнице;
- составы смесей для получения самоуплотняющегося мелкозернистого бетона и мелкозернистого бетона для 3D-аддитивного производства на КВ с применением минеральной добавки ВКВП.

**Степень достоверности результатов работы** обеспечена системой проведенных исследований с использованием сертифицированного и метрологически поверенного современного лабораторного оборудования, а также стандартных средств измерений и методов научных исследований. Полученные результаты не противоречат общепризнанным научным фактам и работам других авторских коллективов. Полученные результаты апробированы в полупромышленных условиях.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены на следующих научно-технических конференциях: Международная научно-практическая конференция, посвященная 65-летию БГТУ им. В. Г. Шухова: Наукоемкие технологии и инновации (XXIII научные чтения) (Белгород, 2019); Международная научная конференция "Industrial and Civil Construction 2022" (Белгород, 2022); «Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова», посвященная 300-летию Российской академии

наук (Белгород, 2022); IX Всероссийская научно-практическая конференция «Инженерное дело на Дальнем Востоке России» (Владивосток, 2024).

**Внедрение результатов исследований.** Выпуск опытно-промышленной партии мелкозернистого бетона для 3D-аддитивного производства выполнялся на предприятии Белгородской области ООО «КЕЙКОД». Также с фирмой ООО «КЕЙКОД» подписан акт производства стелы из мелкозернистого бетона на основе КВ с минеральной добавкой тонкомолотого ВКВП и мелкого заполнителя из отсева дробления КВП и протоколы о внедрении вышеизложенных исследований при изготовлении МАФ в Белгороде и в Екатеринбурге.

С АНО "Центр содействия строительства Белгородской области" был подписан протокол о намерениях использования уличных светильников из самоуплотняющегося мелкозернистого бетона на КВ с минеральной добавкой ВКВП в качестве МАФ на территории «Белого квартала» в Белгороде.

Компании по производству и продаже бетона в Китае, Ираке и Саудовской Аравии заинтересовались результатами исследований диссертационной работы и подписали протоколы о намерениях использования данных научных разработок по мелкозернистым бетонам с заменой части портландцемента на тонкомолотые минеральные добавки при производстве МАФ.

На основании выполненных исследований подготовленные геологическими процессами ВКВП отнесены в разряд полезных ископаемых, о чем подписан протокол о намерениях с представителями геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

В рамках внедрения результатов работы разработаны: технологический регламент и стандарт организации СТО 02066339-076-2024 на производство мелкозернистого бетона на основе КВ с использованием ВКВП и мелкого заполнителя из отсева дробления КВП для 3D-аддитивного производства.

Теоретические положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке студентов бакалавриата, обучающихся по направлению 08.03.01 «Строительство» образовательной программы

«Производство строительных материалов, изделий и конструкций» и магистратуры, обучающихся по направлению 08.04.01 «Строительство» образовательной программы «Эффективные композиты для зеленого строительства» в рабочей программе «Технологии эффективных композитов для зеленого строительства».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 3 статьи в центральных рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Личный вклад автора.** Состоит в обосновании рабочей гипотезы и научной идеи, постановке цели и задач исследования, в анализе теоретических данных по проблеме исследования, в планировании и реализации экспериментов, анализе и обобщении результатов исследований, формулировке научной новизны, выводов, положений прикладных решений и разработок. Принято участие в апробации и внедрении результатов исследования.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, приложений и списка литературы из 152 наименований. Работа изложена на 163 страницах, включает 44 рисунка и 29 таблиц.

## 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

С самого начала существования человечества люди стремились изучить и освоить материалы. Важность этого намерения отражается в контексте названий доисторических периодов, таких как, «каменный век», «бронзовый век» или «железный век» [1-6]. Современные объёмы производства бетона вполне могут оправдать понятие «бетонный век», если продолжать эту терминологию. Бетон является массовым строительным материалом строительной индустрии, и, похоже, альтернативы ему не будет, по крайней мере, для следующего поколения [7-11].

Бетон является востребованным и весьма перспективным материалом в современной реализации строительной и архитектурной сфер производства, которые, в свою очередь, оказывают немалое влияние на экологический баланс [12-16]. Несмотря на то что бетон является очень устойчивым и экологически чистым материалом, его масштабное применение влечет за собой серьёзную социальную и экологическую ответственность для производителей цемента, стремящихся к созданию конкурентоспособной продукции.

Прогрессивная стройиндустрия, спустя примерно 30 лет после первого появления бетона, значительно трансформировалась. Стандартизируются подходящие методы испытаний для определения свойств бетонов, совершенствуются общие технические условия и испытания, разработаны новые концепции проектирования мелкозернистых бетонов [17,18]. Представленная научная работа позволяет дополнить постоянно растущий опыт успешного создания стабильного и долговечного мелкозернистого бетона.

Мелкозернистые бетоны в современной стройиндустрии широко применяются для изготовления МАФ. Это связано с сочетанием функциональности, эстетичности и экономической эффективности данного вида бетонов [19]. Отличительные свойства мелкозернистого бетона, такие, как удобоукладываемость, заполняющая способность и сопротивление сегрегации,

позволяют создавать архитектурные изделия сложной геометрии с возможностью эксплуатации на открытом воздухе [20].

С учетом изложенного выше, в данной диссертационной работе особое внимание уделяется вопросу устойчивости мелкозернистого бетона и возможности улучшения общего экологического баланса конечного продукта. Более эффективное использование цемента в сочетании с концепциями интеллектуального проектирования бетона, заключающегося в применении подготовленного геологическими процессами ВКВП в качестве минеральной добавки композиционного вяжущего, может значительно улучшить этот экологический баланс [21].

Использование промышленных отходов для производства мелкозернистых бетонов может превратить их в ценный ресурс. Так, например, при добыче и применении полезных ископаемых образуется большое количество минеральных отходов. Их утилизация представляет собой серьёзную проблему не только для горнодобывающих предприятий, но и для общества [22]. Поэтому использование таких пород, как подготовленный геологическими процессами кварцитопесчаник, может быть эффективно интегрировано в концепцию строительного проектирования, при этом происходит снижение затрат на сырьё, оптимизируются производственные расходы и повышается конкурентоспособность. Таким образом, применение ВКВП в стройиндустрии немаловажно как для сохранения окружающей среды, так и для экономического преимущества отрасли. Использование переработанных материалов и вторичного сырья позволяет значительно снизить затраты на покупку первичных ресурсов. Технологии энергосбережения, такие как рекуперация тепла и использование возобновляемых источников энергии, помогают снизить затраты на электроэнергию [23]. Устойчивое развитие становится значительным фактором для покупателей и потребителей, что делает продукцию с меньшим углеродным следом более востребованной на рынке.

Примеры таких преимуществ можно увидеть, например, при производстве технического сырья, где использование переработанных материалов

стимулирует развитие перерабатывающей отрасли и создаёт новые возможности для инвестиций и повышения рентабельности.

### **1.1 Малые архитектурные формы как элемент формирования градостроительной среды**

Малые архитектурные формы являются важным инструментом для формирования окружающей среды. Использование МАФ в городском пространстве способствует реализации сразу нескольких задач, таких, как красота, комфорт и аутентичность.

При проектировании МАФ в строительной индустрии важно придерживаться основных принципов. В рамках общей концепции благоустройства элементы МАФ должны композиционно и эстетически сочетаться друг с другом и выполнять необходимые задачи [24]. Утилитарная функция и дизайн должны гармонизировать, при этом сочетать простоту и удобство в использовании. Также немаловажно сохранять связь дизайна с историей места проектирования [25].

Знания о воздействии архитектурно-пространственных и малых архитектурных форм очень важны для созидания архитекторами духовной архитектуры и внедрения концепции проектирования эмоций и переживаний человека; они также открывают возможности для создания пространств, которые обогащают жизнь людей и вдохновляют грядущие поколения [26]. Социальная роль архитектуры в жизни человека была направлена в основном на благо человека, но при этом первенство отдавалось объекту, а человеку отводилась второстепенная роль [27].

Современный архитектурный тренд состоит в том, что главным становится человек; его среда обитания должна быть комфортной, особенно это важно в последние годы [28]. Архитектура, изначально призванная обеспечить убежище, сегодня превращается в объект исследования психологии искусства. Эволюция

от формы к психологическому благополучию подчеркивает значение архитектурно-пространственной среды.

Определенно, значимость архитектуры в жизни человека очень велика. Основные требования к качеству жилища радикально трансформировались. Архитектура тысячелетиями физически и концептуально формировала человеческое общество, предоставляя людям пространство для жизни, работы и развлечений [29]. Архитектура служит функциональной цели, но также является средством художественного выражения, культурной репрезентации и социальной коммуникации [30]. За многовековую историю мы прошли путь от пещер до внедрения систем, создающих условия для активного труда и восстановления работоспособности после рабочего дня, научились создавать интеллектуальные здания и сооружения с комфортными условиями для жизни человека и соблюдением влажностных, температурных характеристик, качественных показателей состава воздуха, акустики, колористики и т.д.

Исследователи в области взаимодействия архитектуры и эмоционального мира человека А.Г. Раппопорт и Г. Ю. Сомов отмечают, что комфортность – существенная характеристика информационно-эмоционального воздействия архитектуры на человека [31]. Однако формирование социальной информации в архитектуре не сводится к критерию комфортности. Прежде всего, архитектурная среда – это некоторая совокупность условий для деятельности людей.

Архитектура формирует то, как мы живем, работаем и взаимодействуем с окружающим миром [32]. От высоких небоскребов до скромных коттеджей – каждое строение воздействует на поведение человека, а архитектурные решения находят отклик далеко за пределами простой эстетики, оказывая глубокое влияние на нашу жизнь.

А. В. Иконников так говорил о роли архитектора в жизни человечества: «Создать организованное пространство, среду, в которой люди живут и работают, – главная задача архитектора [33]. Главная, но не единственная. Окружающая среда воздействует на психику людей, на формирование их

сознания. Материальные формы, которые использует архитектура, несут в себе информацию, подсказывающую человеку характер его поведения в данной обстановке [34]. Обеспечить благоприятный «психологический климат», вызвать определенные эмоции, возбудить в сознании людей образы, раскрывающие общественное содержание произведения архитектуры, наконец, удовлетворить потребность человека в прекрасном – все это входит в задачу зодчего» [35]. С помощью применения различных архитектурных средств необходимо создать комфортные условия для проживания людей.

Современное общество предъявляет новые требования к городской среде. Жители городов ставят актуальные задачи перед городским развитием, которые могут быть решены путем модификации пространства [36]. Таким образом, современная городская инфраструктура многих городов в России преобразуется. Применение МАФ в городской среде обеспечивает высокий уровень благоустройства и создает комфортную окружающую среду для жизнедеятельности человека.

Малые архитектурные формы являются качественным инструментом для формирования градостроительной среды при оформлении и благоустройстве городского пространства — массовой жилой застройки и общественных мест рекреационного и спортивного назначения, а также в парках и садах, в индивидуальном жилищном строительстве [37].

Таким образом, МАФ позволяют дополнять общую композицию архитектурного ансамбля застройки выполняя при этом как утилитарные, так и декоративные задачи, сочетая в себе эргономичность и безопасность. Малые архитектурные формы могут быть стационарными и переносными, что дает возможность решать сразу несколько задач при создании функциональных и удобных пространств, соблюдая соответствие общему архитектурному стилю городской среды.

При применении МАФ в эстетическом оформлении жилищного пространства важно не нарушать существующие архитектурные композиции и

соблюдать соответствие установленным нормам и стандартам для данного вида архитектурных изделий.

Формирование архитектурно-пространственной среды при помощи малых архитектурных форм подчиняется некоторым принципам проектирования, таким, как учет климатических условий, долговечность и простота в обслуживании [38]. Важно использовать материалы, устойчивые к воздействию внешней среды, осадкам, солнечному излучению и перепадам температур, при этом МАФ должны быть рассчитаны на длительное использование без необходимости регулярного ремонта или замены [39].

## **1.2 Опыт применения мелкозернистого бетона в современном строительстве**

Архитектурная выразительность здания в настоящее время является неотъемлемой частью процесса проектирования и разработки сооружений. Даже при строительстве заводов и фабрик используются специальные архитектурные формы и эскизы, которые придают зданию определенный стиль отделки, это особенно актуально, если промышленное здание находится в черте города [40]. При правильном выборе архитектурной выразительности здание гармонично впишется в общую стилистику города, не будет выбиваться из общей концепции дизайна.

Архитектурная среда постоянно и незаметно воздействует на человека: определяет его эмоциональное настроение и поведение [41]. Поэтому задачей проектировщиков и архитекторов при создании архитектурной среды обитания являются основные принципы российского градостроительства: совмещать существующие системы функционального назначения (парки, детские площадки, лесопосадки, зеленые лужайки и т.п.) с предстоящим возведением архитектурного объекта (жилой дом, общественное или производственное здание, спортивные сооружения и пр.); обеспечивать устойчивость, жесткость, долговечность, комфорт и привлекательный облик сооружения [42].

Для решения подобных задач возникает необходимость создания материала, обладающего высокой стойкостью к внешним воздействиям, имеющим высокую прочность, высочайшее сопротивление к сжатию, изгибу и истиранию; материал также должен быть удобоукладываемым, приобретать практически любую форму при монтаже, восприимчивым к специальным добавкам, которые придадут ему дополнительные свойства [43].

Декоративный вид мелкозернистого бетона наиболее рационален в качестве использования при производстве МАФ. Это бетон сочетает в себе функциональность и красоту, что позволяет преобразовать современное строительство [44]. Как и традиционный бетон, он долговечен, но может имитировать различные текстуры, цвета и формы, придавая гибкость процессу проектирования [45]. Это даёт архитекторам возможность возводить прочные и визуально привлекательные здания, сохраняя баланс между формой и функцией, поддерживая условия комфортной среды обитания человека. Данный вид бетона используется для отделки экстерьеров, интерьеров, ландшафтов, создания малых архитектурных форм, а также для придания эстетичности и прочности видимым поверхностям [46]. Чтобы материал был долговечным, функциональным и визуально привлекательным, необходимо осуществлять правильный подбор состава бетонной смеси. Разработку декоративного мелкозернистого бетона важно производить с учетом теоретических положений геоники (геомиметики) [47].

При строительстве из декоративного мелкозернистого бетона применяются тщательно подобранные материалы для придания конструкции прочности и эстетичного вида [48]. Таким образом, цемент усиливает фактурность поверхности, цветные пигменты придают необходимый оттенок, а добавки повышают такие свойства, как удобоукладываемость, прочность и время затвердевания. Для удовлетворения структурных и эстетических потребностей проекта рекомендуется выбирать местные материалы.

Благодаря внедрению декоративного мелкозернистого бетона, безликие серые железобетонные конструкции зданий и сооружений городской среды

сменяются на эстетически привлекательные архитектурные объекты, которые улучшают образ жизни человека, максимизируют производительность его труда, обеспечивают психическую стабильность, что повышает качество жизни [49].

В настоящее время декоративный мелкозернистый бетон является одним из самых универсальных строительных материалов, который широко используется для возведения сооружений и зданий различного функционального назначения, разных форм, цветовых решений и размеров, ландшафтного оформления и интерьерного дизайна. Особо отмечаются свойства декоративного мелкозернистого бетона как материала для реставрации памятников архитектуры, для производства индивидуальных уникальных изделий, преобразующих общественные пространства (рисунок 1.1) [50].

Технология строительства может быть сборно-монолитная или монолитная. Следует учитывать технологию укладки бетонной смеси, которая зависит от вида конструкции объекта: если вертикальная - компоненты бетона должны быть устойчивы к расслоению; если укладка горизонтальная - для распространения по плоскости бетонная смесь должна быть подвижной.



Рисунок 1.1 - Примеры уникальных изделий из декоративного мелкозернистого бетона:

*а* - христианская церковь в Лондоне; *б* - «свадебное пространство» в Тайланде

Геометрический вид декоративного мелкозернистого бетона получил широкое распространение в строительстве за рубежом (Германия, Австрия,

Китай и др.) как решающий многие задачи строительной отрасли (рисунок 1.2) [51].

Геометрические конфигурации сооружений из декоративного мелкозернистого бетона соответствуют геометрическим телам (конус, цилиндр, призма, шар, пирамида и т.д.). Следует отметить, что древние архитектурные сооружения (менгиры, дольмены, обелиски, кромлехи) уже строились по геометрическим формам и носили религиозный характер [52].

Каждая из геометрических фигур, составляющая основу объемно-пространственного архитектурного сооружения обладает своими индивидуальными свойствами [53]. Для снижения шума в помещениях используется форма конуса, которая позволяет преобразовывать звуковую волну. Пирамида считается наиболее прочной фигурой за счет большой площади основания, которая придаёт прочность этой форме, уменьшая массу сооружения при увеличении высоты.

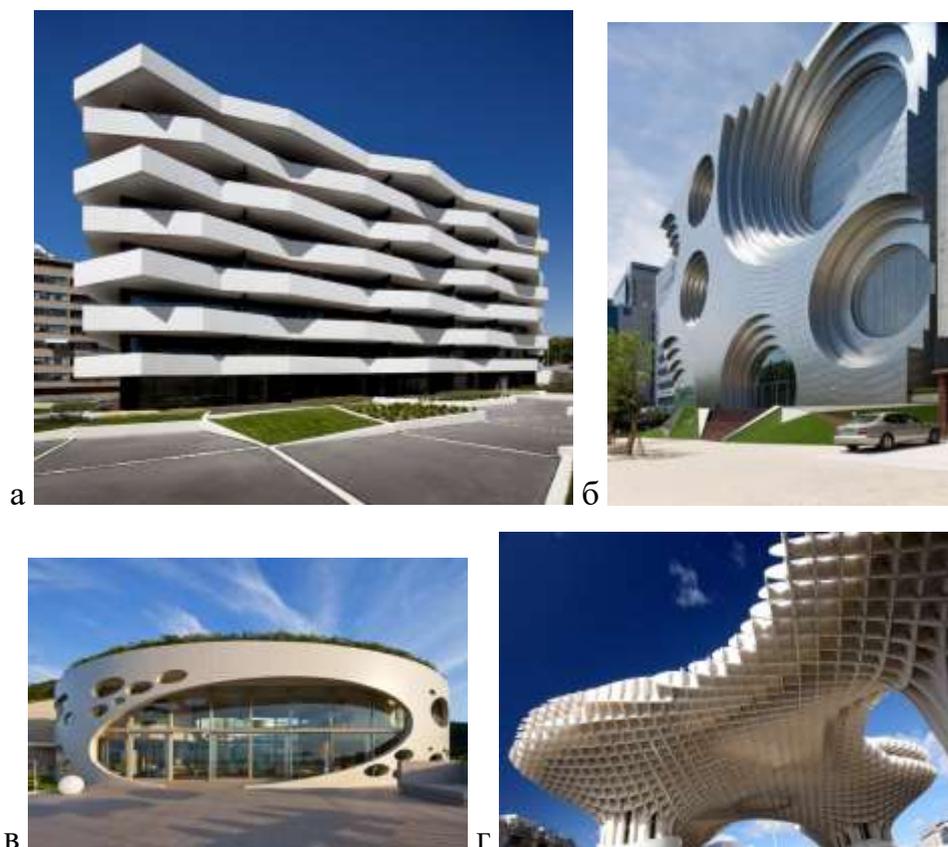


Рисунок 1.2 - Примеры объектов из геометрического вида декоративного мелкозернистого бетона: *а* - офисное здание во Франции; *б* - здание в Карелии; *в* - отель в Японии; *г* - офис в Австралии

Декоративный мелкозернистый бетон - эстетически универсальный строительный материал, наиболее востребованный для возведения больших строительных объектов разнообразных геометрических форм [54]. Гибкость бетона в дизайне позволяет проектировщику создавать конструкции, невозможные при использовании других строительных материалов. Сочетание этой гибкости с оптимизацией бетонных смесей позволяет создавать конструкции, представляющие истинную архитектурную ценность.

В зарубежных странах декоративный мелкозернистый бетон очень давно и активно применяется в строительстве, большое внимание уделяется геометрическому декоративному бетону [55]. Использование так называемого лицевого бетона предполагает высокие требования к качеству лицевых поверхностей, для финишной облицовки фасадов зданий и стен помещений, возможности применения его для каркасно-монолитного строительства. Зарубежными исследователями и специалистами разработан и опубликован свод Правил по использованию декоративного мелкозернистого бетона, где к лицевым поверхностям предъявляются высокие требования.

В России декоративный мелкозернистый бетон не нашел пока широкого применения, но тем не менее с проникновением новых трендов в отрасль интерес к нему начинает постепенно расти.

Современное стремительное развитие технического прогресса научных направлений повлияло на образование и развитие новых областей науки в бетоноведении [56]. Появились такие направления, как строительное материаловедение, 3D-аддитивные технологии, зеленое строительство, архитектурное материаловедение. Архитектурное материаловедение способствовало появлению многочисленных всемирно известных объектов, при возведении которых использовались положения архитектурной геоники и бионики, подражая объектам неорганического и органического мира; при их сооружении применялись современные высококачественные строительные композиты (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 - Примеры бионических архитектурных объектов:

*а* - дом в виде ракушки (Мексика, Наукальпан-де-Хуарис); *б* - павильон Мира в парке (Великобритания, Лондон)

Одним из видов декоративного мелкозернистого бетона является декоративный бетон, который существует более 100 лет и с успехом заменяет естественный камень, гипс, шамот. На протяжении последних лет декоративный бетон получает все большее признание в качестве материала, используемого для повышения эстетической привлекательности зданий и сооружений [57]. Этот материал популярен во всем мире, особенно в Европе и Америке.

В последние годы в России декоративный бетон широко используется в ландшафтном строительстве (садово-парковые скульптуры, цветочницы, малые архитектурные формы и т.п.), отделке фасадов и интерьеров (барельефы, лепнина, балясины и пр.), при возведении ограждающих конструкций (заборы, парапеты, бордюры и т.п.), в процессе реставрационных работ (создание имитации мрамора, кирпича, натурального камня, рельефной и гладкой поверхности и пр.), укладки тротуарной плитки.

Уникальность декоративного мелкозернистого бетона состоит в том, что в зависимости от решаемых задач возможно изменять состав бетонной смеси с помощью применения различных добавок, которые существенно улучшают как конструктивные свойства (прочность, устойчивость, гидрофобность и т.д.), так и декоративные качества (текстуру, фактуру, цвет). Для цветных бетонов применяют широкую гамму белых и цветных пигментов зарубежного и отечественного производства. Для большей выразительности текстурной

поверхности в состав бетонной смеси вводят мелкий заполнитель горных пород и искусственно полученный (керамзит и т.п.) (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 - Примеры изделий из декоративного бетона

Современную архитектуру невозможно представить без использования декоративного мелкозернистого бетона. Этот материал предоставляет практически безграничную возможность для реализации индивидуальных архитектурных решений [58]. В настоящее время на российском рынке работают компании, осуществляющие строительство из декоративного мелкозернистого бетона: SEVERIN DEVELOPMENT, PERI, BARKA, Эдиал Групп, «Техноком-БМ» (опалубочные системы «ГАММА»), заводы декоративного мелкозернистого бетона в Москве, Воронеже, Санкт-Петербурге, Пензе, Белгороде и др. [59].

Таким образом аналитический обзор доступной информации показывает, что для успешного и интенсивного развития этого направления в строительстве необходим более широкий обмен информацией и опытом, полученным при реализации каждого уникального объекта, между строительными компаниями.

### 1.3 Особенности проектирования мелкозернистых бетонов

Учитывая фундаментальное значение декоративного мелкозернистого бетона для формирования городской среды, широкий спектр областей применения и значительные требования к его характеристикам необходимо разработать теоретические основы и предложения композитов нового поколения. В настоящее время для их создания ведущими научными школами используются теоретические положения новой трансдисциплинарной науки геоники (геомиметики) [60], в том числе теории техногенного метосамозоста, закона сродства структур для проектирования анизотропных материалов и закона подобия для создания высокополнценных композитов [61].

В трансдисциплинарном направлении исследований геоники (геомиметики) производится анализ важнейших аспектов: улучшение качества жизни человека, разработка новых технологий получения композитов, использование энергетики геологических и космических процессов, разработка алгоритмов и моделей создания и управления объектами неорганического мира, вопросы энергосбережения, освоение и строительство подземных пространств, проблемы развития (сосуществования) органического и неорганического мира, архитектурная геоника.

В теоретических основах геоники (геомиметики) выделены следующие положения:

- *теория техногенного метосамозоста* в строительном материаловедении подразумевает этап эволюции строительных материалов, на котором происходит адаптация композита к изменяющимся условиям эксплуатации зданий и сооружений. Этот процесс представляет собой сложную систему, включающую различные преобразования: изменения в кристаллической решетке минералов, аутогенез, кристаллохимические реакции, перекристаллизацию, диффузию, дегидратацию и другие.

- *закон сродства структур* позволяет проектировать слоистые композиты и системы для ремонта на различных уровнях (нано-, микро-, макро-), схожие с базовой матрицей. Это ведет к улучшению адгезии и долговечности материалов, так как вся многокомпонентная система работает как единое целое.

- *закон подобия* в проектировании высокопрочных материалов указывает на то, что прочность и долговечность композитов зависят от схожести их физических, механических и химических свойств, что способствует получению материалов с близкими характеристиками теплового расширения и деформативности. Этот принцип применяется в создании изделий и конструкций для фортификационных объектов, строительства в Арктике, дорожного строительства и уникальных сооружений.

Применение и реализация данной научной основы дает широкие возможности для производства композитов, способных оградить человека от отрицательного воздействия техногенных процессов и значительно улучшить качество жизни. На сегодняшний день проектировщики и архитекторы ставят перед собой задачи, которые заключаются не только в обеспечении устойчивости, жесткости, долговечности, комфорта здания, но и задачи создания привлекательного облика сооружения.

Анализируя доступную информацию по разработкам смесей для мелкозернистого бетона МАФ, в частности декоративного, можно отметить, что в России и за рубежом активно ведутся разработки смесей для мелкозернистого бетона, основой которых является разнообразный спектр сырьевых материалов: белый или сероватый цемент, цветные цементы, гипсовые вяжущие, композиционные вяжущие, модифицированные активными минеральными и органическими добавками. Эти добавки способствуют улучшению конструктивных свойств (прочность, гидрофобность и пр.) и декоративных качеств [62]. Главное требование к сырьевым смесям заключается в том, что они должны удовлетворять требованиям нормативных документов.

Основные технические характеристики мелкозернистого бетона должны соответствовать требованиям ГОСТ 31108-2016, который распространяется на

бетоны, применяемые во всех видах строительства и климатических зонах, и устанавливают технические требования к бетонам, правилам приемки, методам контроля.

Современные бетонные смеси представляют собой многокомпонентные материалы с модификаторами различного функционального назначения, содержащие в своем составе до 7-8 компонентов, в отличие от обычного 4-компонентного бетона [63]. Входящие в состав бетонной смеси органические и минеральные добавки, эффективно использующие гидратационную активность цемента, позволяют получать бетоны с высокими показателями эксплуатационных свойств, надежности и долговечности.

Современные бетонные смеси представляют собой многокомпонентные материалы с добавками, выполняющими различные функции, и могут содержать до 7–8 компонентов. Это отличие от традиционного 4-компонентного бетона позволяет использовать органические и минеральные добавки для повышения эксплуатационных характеристик бетона, таких как надежность и долговечность. Современные наполненные цементные системы, модифицированные суперпластификаторами и с добавлением минеральных микронаполнителей, открывают новые возможности для регулирования процессов структурообразования и твердения, а также для оптимизации состава бетонов с учетом топологии цементных систем, гранулометрии компонентов и состояния поверхности минеральных частиц [64-68].

Для приготовления бетонных смесей используются различные виды цемента, такие как портландцемент и шлакопортландцемент (по ГОСТ 31108-2016), белые цементы по ГОСТ 965-89 и цветные цементы по ГОСТ 15825-80. Применение серого цемента может привести к вариациям цвета, так как условия производства и хранения могут влиять на оттенок поверхности декоративного бетона. Для обеспечения более интенсивного и однородного цвета декоративного бетона рекомендуется использовать белый цемент и добавлять пигменты или тонкодисперсные добавки. Белый цемент отличается от

серого не только по скорости твердения, но и по прочности, а также обладает высокой атмосферной устойчивостью, сульфатостойкостью и водостойкостью.

Для получения высококачественного мелкозернистого бетона крайне важен правильный выбор гранулометрического состава используемых заполнителей. Этот параметр существенно влияет на внешний вид конечного материала. Смеси с прерывистым гранулометрическим составом, применяемые в архитектурных бетонах с оголенным крупным заполнителем, должны быть протестированы в сочетании с бетонными составами для оценки их прочности и долговечности. В зависимости от требуемых физико-механических характеристик и декоративных свойств бетона, в качестве заполнителей могут использоваться как щебень и гравий из плотных горных пород по ГОСТ 8267-93, так и пористые материалы, соответствующие ГОСТ 32496-2013. При этом содержание слабых зерен и примесей, таких как глинистые минералы, гумусовые кислоты и серосодержащие породы, должно быть минимизировано или полностью исключено, особенно при производстве бетона для наружных покрытий, подверженных воздействию атмосферных условий.

В качестве природных заполнителей могут использоваться различные виды гравия и щебня, а также искусственные материалы, такие как керамзит, доменные шлаки, нереакционноспособное стекло и керамика. Все используемые заполнители для конкретной конструкции должны поступать из одного источника, чтобы обеспечить соответствие цвета и качества утвержденному образцу. Для создания контрастных поверхностей возможно комбинирование разных типов заполнителей, при условии соблюдения необходимых показателей прочности, долговечности и удобоукладываемости бетона. Выбор заполнителей также зависит от желаемого архитектурного эффекта, поскольку вид породы, цвет, форма и размер заполнителя могут влиять на конечный результат [65-69].

Особое внимание при выборе заполнителей стоит уделить бетону на белом цементе, поскольку темные заполнители могут изменить оттенок бетона в местах, где слой раствора тонкий, создавая эффект «просвечивания» заполнителя. Также необходимо осторожно подходить к выбору заполнителей,

которые будут подвергаться ударно-абразивным воздействиям, чтобы избежать излишнего контраста между цветом заполнителя и растворной части бетона.

Для достижения требуемых характеристик физико-механических свойств, в бетонные смеси могут быть добавлены химические и минеральные добавки. Воздухововлекающие добавки рекомендуется использовать при производстве бетона с высокими требованиями по морозостойкости, а также для улучшения удобоукладываемости смесей. Пластифицирующие и суперпластифицирующие добавки являются неотъемлемой частью производства высококачественного декоративного бетона, особенно когда необходимы высокие показатели прочности и удобоукладываемости [70]. Активные минеральные добавки по ГОСТ Р 56196-2015 могут использоваться для улучшения физико-механических свойств бетона, увеличения его долговечности и стойкости к коррозии, а также для изменения его цвета.

Цвет декоративного бетона обеспечивается использованием пигментов, соответствующих ГОСТ Р 56585-2015. Пигменты представляют собой тонкодисперсные оксиды, которые могут быть как природными, так и синтетическими, при этом последние обычно обладают более однородным цветом. При подборе состава важно учитывать возможность химических реакций пигментов с другими добавками, например, поверхностными замедлителями или кислотами. Обычно дозировка пигментов не превышает 5% от массы цемента, поскольку превышение дозы не всегда приводит к усилению цвета [71]. Для предотвращения изменения цвета рекомендуется предварительно приготовить пробные смеси и оценить возможные изменения в внешнем виде бетона. Кроме того, вода, используемая для улучшения пластичности смесей, должна соответствовать ГОСТ 23732-2011. Вода, содержащая растворенные железо или другие загрязнители, может вызвать нежелательные изменения цвета бетона, поэтому важно контролировать водосодержание смеси, чтобы избежать незапланированных изменений в окраске.

Правильно подобранный состав смеси для декоративного мелкозернистого бетона обеспечивает не только прочность конструкции, но и определенный

внешний вид поверхности. В этом и есть отличие декоративного мелкозернистого бетона от обычного - детальная разработка процесса бетонирования с учетом внешнего вида конструкций [72-75]. Выбор компонентов бетонной смеси для объекта строительства зависит от следующих критериев: типа конструкции, категории поверхности (плоская или рельефная), цвета бетона (пигмент, цемент, заполнитель и др.). Рекомендуемые значения физико-механических показателей мелкозернистого бетона в зависимости от области его применения приведены в таблице 1.1.

В настоящее время именно цементный бетон остается основным конструкционным материалом, и поэтому проблемы улучшения его технологической прочности и долговечности являются наиболее острыми и актуальными. Ряд научных школ занимается исследованиями и разработкой различных видов бетонов нового поколения. В качестве строительного материала для декоративного мелкозернистого бетона наибольший интерес представляет самоуплотняющийся бетон. Данный вид бетона представляет собой интересный строительный материал для декоративных мелкозернистых бетонов. Самоуплотняющийся бетон способен самостоятельно заполнять пространство под воздействием своей массы без необходимости дополнительного уплотнения. [76]. В 1986 г. японские ученые профессора К. Маекава и К. Озава разработали особо прочный состав самоуплотняющегося бетона с рядом уникальных свойств. Профессор Хайима Окамура в 1990 г. изобрел и внедрил в практику новое поколение высокоэффективных добавок к бетону для улучшения текучести на основе полиакрилата и поликорбоксилата. Полученный бетон обладал высокой пластичностью при низком содержании воды. Широкое распространение и развитие этот бетон получил в Западной Европе, особенно в Германии. Исследования в Институте строительных исследований в Аахене (Германия) показали, что прочность на сжатие самоуплотняющегося бетона выше, чем у обычного вибрируемого бетона, а также обладает высокой водонепроницаемостью [77-79].

**Технические требования к мелкозернистому бетону различных областей применения**

Группа показателей	Наименование показателя	Значение показателя для соответствующей области применения			
		Покрытия из мелкозернистого бетона	Несущие стеновые конструкции	Самонесущие конструкции	Объекты монументального искусства
Физико-механические и деформативные показатели	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	2200 –2500	1800 –2500	1400 –2500	1800 – 2500
	Прочность при сжатии Мпа, не менее	60	40	30	60
	Коэффициент размягчения, не менее	0,9	0,9	0,9	0,9
	Модуль упругости, Мпа, не менее	4,0 x 10 <sup>4</sup>	4,0 x 10 <sup>4</sup>	4,0 x 10 <sup>4</sup>	4,0 x 10 <sup>4</sup>
	Относительная деформация усадки, мм/м, не более	0,3	0,3	0,3	0,3
	Марка по истираемости, не ниже	G1	G3	G3	G1
Показатели Долговечности бетона	Морозостойкость, марка	F500	F400	F400	F500
	Водонепроницаемость, марка	W16	W12	W12	W12
Эстетические показатели	Белизна, цвет	В соответствии с утвержденным эталоном			
	Качество поверхности	В соответствии с утвержденным эталоном			

Самоуплотняющийся бетон характеризуется высокой прочностью, хорошей подвижностью и отличной сцепляемостью с арматурой. Модуль упругости самоуплотняющегося бетона ниже на 15% по сравнению с обычным бетоном из-за большего содержания мелких пылевидных частиц и пониженного содержания крупной фракции заполнителя.

Усадка бетона в значительной мере определяется объемом цементного теста, входящего в его состав. Поскольку содержание цементного теста в самоуплотняющемся бетоне (СУБ) отличается от обычного бетона незначительно, показатели усадки у них близки. Благодаря способности СУБ точно воспроизводить форму опалубки, достигается идеально ровная и гладкая поверхность [80,81]. При этом поверхность СУБ высыхает быстрее по сравнению с традиционным бетоном, уплотняемым вибрацией, так как на ней почти не происходит выделения воды. При укладке нового слоя СУБ на уже затвердевший бетон обеспечивается более прочное сцепление по сравнению с виброуплотненным бетоном [82]. Важно подчеркнуть, что при заливке обычного бетона на свежеложенный слой СУБ и последующем виброуплотнении структура СУБ не нарушается.

Добавление фибры в состав СУБ способствует снижению вероятности образования трещин, вызванных усадкой, хотя может негативно повлиять на текучесть смеси. Для каждого типа фиброволокна необходимо подобрать оптимальную дозировку, обеспечивающую баланс между подвижностью и технологическими характеристиками смеси [83]. СУБ, как представитель бетонов нового поколения, наряду с композитами на основе мелкодисперсных порошковых составов (реакционно-порошковых, порошково-активированных с песком или щебнем), способствует увеличению прочности бетона при одновременном снижении удельного расхода цемента на единицу прочности. Бетоны нового поколения могут быть не только высокопрочными, но и использоваться в традиционных классах прочности (B15–B40), при этом характеризуясь низким расходом цемента за счёт оптимизации состава реологической матрицы.

Исследования, посвящённые свойствам СУБ с добавлением пыли из цементных печей, показали, что при правильно подобранном соотношении вода/вяжущее и высоких дозировках данной добавки можно получить СУБ средней прочности с пониженным содержанием цемента и невысокой себестоимостью [84]. Изучение устойчивости таких бетонов к кислотной среде,

коррозионным процессам, а также их термических и сорбционных характеристик позволило установить, что при повышении класса прочности увеличивается и долговечность СУБ, зачастую превосходя показатели традиционного виброуплотненного бетона в аналогичных условиях.

В Германии ведутся разработки самоочищающихся монолитных бетонов. Для этого поверхность должна быть высоководоотталкивающей (супергидрофобная поверхность) или обладать высокой гигроскопичностью, т.е. собирать воду (супергидрофильная поверхность). Первая модифицируется или покрывается силиконовой смолой или тетрафторэтиленом, вторая модифицируется путем использования фотохимических катализаторов. В качестве катализатора используют диоксид титана ( $TiO_2$ ), который слабо взаимодействует в щелочной среде бетона и не виден на поверхности. Его наносят на поверхность распылением; недостаток состоит в том, что этот метод обладает низкой стойкостью к механическим воздействиям [85]. Чтобы этого избежать, предпринимаются попытки введения  $TiO_2$  непосредственно в бетонную смесь. В этом случае при повреждении или износе верхнего слоя внутренний слой также содержит диоксид титана и функция самоочистки продолжается.

Шведские исследователи считают, что необходимо более активно внедрять этот катализатор в городское строительство, выпускать серийно такие стройматериалы и готовые бетонные смеси [86-89]. В США и Японии с использованием фотохимических катализаторов осуществлен первый производственный опыт строительства, но в основном для керамических строительных материалов (плитки). В Риме из самоочищающегося бетона построена церковь «Богатый Милосердием» по проекту американского архитектора Ричарда Мейера [90-93].

В настоящее время актуально получение новых видов бетонов, наиболее приемлемых по составу, структуре и свойствам для изготовления декоративного мелкозернистого бетона, с учетом требований по условиям эксплуатации, т.е. они должны обладать улучшенными качествами по прочности, износо- и

ударостойкости, водо- и морозостойкости, цветостойкости, долговечности, атмосферостойкости, обладать декоративными и антивандальными свойствами, быть экологически чистыми [94-96].

Мелкозернистый бетон не только выполняет опорную и конструкционную функцию, но также играет декоративную роль, имеющую художественную ценность. Впервые технология изготовления декоративного мелкозернистого бетона была запатентована в 60-е гг. прошлого столетия в Америке и с середины XX в. стала активно распространяться в странах Европы и США.

#### **1.4 Специфика технологии производства мелкозернистого бетона**

Мелкозернистый бетон геометрического вида применяется для строительства зданий сложной конфигурации и аналогичен обычному бетону для монолитного строительства, который в последние годы приобрел широкую популярность благодаря своим достоинствам. Ключевыми преимуществами монолитного строительства выступают его универсальность, широкий спектр архитектурных и конструктивных решений, возможность реализации нестандартных пространственных форм, а также повышение теплозащитных характеристик ограждающих конструкций. Кроме того, данная технология способствует увеличению эксплуатационной надежности зданий и сооружений, сокращению сроков возведения объектов и снижению общей себестоимости строительства [97–99].

Комплексное изучение структуры бетона на различных уровнях — от молекулярного до макроскопического — открывает перспективы для создания высокотехнологичных бетонов с улучшенными характеристиками прочности и долговечности. Современные модифицированные бетоны изготавливаются с использованием минеральных добавок разной степени дисперсности, получаемых в основном путём тонкого помола природных минералов и горных пород. При выборе производства работ необходимо учитывать технологию укладки бетонной смеси, которая зависит от вида конструкции объекта: если

вертикальная - компоненты бетона должны быть устойчивы к расслоению, если укладка горизонтальная - бетонная смесь должна быть подвижной.

Кроме правильно подобранной бетонной смеси для декоративного мелкозернистого бетона важным фактором является опалубка, соответствующая требованиям ГОСТ 34329-17 «Опалубка. Общие технические условия». Типы опалубки подбираются согласно ГОСТ 34329-17 в зависимости от вида монолитных конструкций.

Для декоративного мелкозернистого бетона при выборе опалубочной системы учитывается:

- жесткость конструкции - опалубка должна выдерживать давление бетонной смеси с минимальными прогибами и отклонениями;
- возможность устанавливать тяжести;
- возможность создать нужную форму и требуемый отпечаток на бетонной поверхности.

Не все опалубочные системы подойдут для работы с декоративным мелкозернистым бетоном, выбор системы напрямую зависит от геометрии объекта. Например, рамно-щитовая опалубка имеет стандартные размеры щитов, что ограничивает возможность создавать объекты большей высоты без швов на поверхности бетона. Системы из балок и ригелей позволяют собрать опалубку по заданным размерам, высоте и геометрии [100-104]. Эта система используется фирмой PERI. Одним из ярких реализованных проектов фирмы с использованием опалубки VALIO является здание MATREX (Матрешка) в Сколково. Сооружение представляет собой 55-метровую стеклянную пирамиду с монолитной бетонной несущей конструкцией в виде матрешки внутри [105].

Для геометрически ориентированных мелкозернистых бетонов наибольший интерес представляет технология сборно-монолитного строительства, предусматривающая совместное применение декоративных бетонных элементов заводского изготовления и монолитного мелкозернистого декоративного бетона, укладываемого на строительной площадке. Данный подход считается одним из наиболее эффективных и перспективных для

реализации архитектурно-художественных замыслов высокой степени сложности.

В рамках этой технологии выделяют три основных направления использования сборно-монолитных конструкций с мелкозернистым бетоном:

- создание визуальной целостности между сборными и монолитными частями конструкции за счёт подбора одинакового состава бетонных смесей, использования идентичных форм и обеспечения одинаковых условий твердения, что позволяет достичь единства цвета и фактуры поверхностей;

- контрастное сочетание по цвету и текстуре между заводскими элементами и участками монолитного бетона, придающее объекту выразительный декоративный эффект;

- применение заводских декоративных изделий в роли несъёмной опалубки, что позволяет значительно упростить процесс строительства и интегрировать декоративную функцию непосредственно в конструктивную систему.

Особый интерес представляет третий подход, при котором заводские элементы выполняют функцию несъёмной опалубки в процессе возведения монолитных конструкций по технологии 3D-строительства. Этот метод открывает широкие возможности для ускоренного и эстетически привлекательного монолитного строительства с высокой степенью индивидуализации архитектурных решений [106-108].

Строительная отрасль в России в последнее время развивается высокими темпами, и возведению уникальных зданий и сооружений уделяется большое внимание (рисунок 1.5). На данный аспект оказало влияние проведение Олимпийских игр в нашей стране, Чемпионата мира по футболу и пр.

Разработка оригинальных проектов и их реализация требует новых технологий для производства работ. Инновационные технологии декоративного мелкозернистого бетона находят широкое распространение в основном за рубежом. Одна из таких технологий - это каркасно-монолитное строительство зданий из лицевого бетона (Рисунок 1.6) [109].



Рисунок 1.5 – Монолитный фрагмент лестницы из геометрического декоративного мелкозернистого бетона (компания Эдиал Групп)

Главное для мелкозернистого бетона его лицевая бетонная поверхность заданного класса, цвета, в структуру которой архитектором добавлены линии, неровности, ниши, текст, отверстия [110-114]. Правильно подобранный состав бетонной смеси, опалубочная система и оснастка к ней позволяют создать объект строительства, уникальный по геометрии и внешнему виду.



Рисунок 1.6 – Примеры зданий из «лицевого» бетона (Германия)

Немецкой ассоциацией бетона (DBV) разработан кодекс «Декоративный мелкозернистый бетон», в котором выделены четыре класса требований к лицевой поверхности бетона: SB1, SB2, SB3, SB4. Это нормативный документ, определяющий требования к лицевым поверхностям декоративного мелкозернистого бетона, в зависимости от назначения возводимого объекта:

SB1 – бетон с низкими требованиями к поверхности (используется при возведении подвалов, подземных гаражей); SB2 – бетон с нормальными требованиями к поверхности (используется при возведении гражданских сооружений, лестниц); SB3 – бетон с повышенными требованиями к поверхности (используется при возведении внешних фасадов зданий и сооружений); SB4 – бетон с особо высокими требованиями к поверхности. Применение этой технологии практически не ограничивает области использования лицевого бетона, но при этом, в зависимости от функциональности объекта, требования разделяются по двум основным направлениям:

- при строительстве административных зданий (торговые и бизнес-центры, учреждения образования) требования к лицевым поверхностям максимальны и должны соответствовать классам поверхностей SB3-SB4;

- при строительстве паркингов, причалов, тоннелей, переходов и т.п. требования к лицевым поверхностям должны соответствовать классам поверхностей SB1-SB2.

При использовании технологии лицевого бетона требуется применение опалубки, без которой невозможно создать необходимую геометрию возводимого объекта, и детальная проработка всех узлов. Следует отметить, что возведение конструкций с применением декоративного мелкозернистого бетона требует наличия достаточного опыта работы с данной технологией.

Для получения необходимых характеристик поверхности большое значение имеют качество и состав бетона, а также технология его укладки [119]. Правильно уложенный бетон имеет однородный цвет и структуру. Кроме того, от состава бетона напрямую зависят цвет и фактура получаемой поверхности.

Сегодня в странах Европы (Германии, Швейцарии, Австрии, Италии) технология лицевого бетона становится все более востребованной, о чем свидетельствует большое число крупных объектов, построенных с использованием данного метода, например:

- музей Mercedes-Benz в Штутгарте (Германия);

- аэропорт Toulouse-Blagnac (Франция);
- отель Blue Heaven Hotel во Франкфурте-на-Майне (Германия);
- бизнес-центр White Wind Office Building в Риге (Латвия);
- аэропорт в Таллине (Эстония).

Изучение зарубежного опыта применения мелкозернистого бетона различного типа в современной архитектуре и строительной индустрии позволяет сделать выводы о его широкой реализации и незаменимости в создании качественной градостроительной среды, удовлетворяющей эстетическим и функциональным требованиям, а также стандартам безопасности. Этот материал предоставляет практически безграничную возможность для реализации индивидуальных архитектурных решений, применяя высокопрочные инновационные составы, передовые технологии армирования и обработки поверхности [120-123]. Потенциал использования декоративного мелкозернистого бетона позволяет создать неповторимые элементы ландшафта, интерьера, фасадов зданий, разнообразных геометрических форм сооружений.

## 1.5 Выводы

1. Применение мелкозернистого бетона при изготовлении малых архитектурных форм позволяет решать ряд актуальных проблем градостроительной среды при создании комфортного общественного пространства. При этом МАФ являются элементом зонирования, помогают расставлять композиционные акценты и обеспечивают плавный переход от искусственной среды к естественной.

2. Современную архитектуру невозможно представить без использования мелкозернистого бетона. Данный вид бетона является незаменимым в строительной индустрии благодаря своим высоким эстетическим и архитектурным свойствам, оформляющим пространственную среду для жизни и деятельности людей. Для успешного и интенсивного развития этого направления

в строительстве необходим более широкий обмен информацией и опытом, полученным при реализации каждого уникального объекта, между строительными компаниями.

3. Сегодня проектировщики и архитекторы ставят перед собой задачи, которые заключаются не только в обеспечении устойчивости, жесткости, долговечности, комфорта здания, но и задачи создания привлекательного облика сооружения, что позволяет преобразить облик городского пространства.

4. В настоящее время актуально получение новых видов бетонов, наиболее приемлемых по составу, структуре и свойствам для изготовления мелкозернистого бетона, с учетом требований по условиям эксплуатации, т.е. они должны обладать улучшенными качествами по прочности, износо- и ударостойкости, водо- и морозостойкости, цветостойкости, долговечности, атмосферостойкости, обладать декоративными и антивандальными свойствами, быть экологически чистыми.

5. Мелкозернистый бетон считается одним из самых универсальных материалов с большим количеством функциональных возможностей для реализации индивидуальных архитектурных решений, применяя высокопрочные инновационные составы, передовые технологии армирования и обработки поверхности. Потенциал использования данного вида бетона позволяет создать неповторимые элементы ландшафта, интерьера, фасадов зданий, разнообразных геометрических форм сооружений.

6. Технология для производства композиционных вяжущих на основе техногенного сырья с органоминеральными добавками дает возможность получить высококачественные экологически безопасные продукты и утилизировать в своем составе отходы, вовлекая их в оборот сырьевых ресурсов, что стимулирует повторное использование отходов горнорудного производства и позволяет снизить расход цемента без снижения прочностных характеристик.

## 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Основные экспериментальные исследования проводились в Центре высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова, испытательном центре «БГТУ - сертис», в лабораториях кафедры инженерно-строительного института и кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. Особенности сырьевых и разработанных материалов, их состав и микроструктура изучались с помощью методов растровой электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и стандартных методик, регламентируемых ГОСТ [124].

### 2.1 Методы исследований

Рентгенофазовый анализ (РФА) использовали для качественной оценки фазового состава сырьевых материалов, компонентов вяжущего и затвердевших смесей. В данной работе рентгенофазовый анализ проводили методом порошковых дифрактограмм. Его применяют для исследования поликристаллических веществ в частности, различных строительных материалов.

#### Режимы работы дифрактометра ДРОН -3М

трубка рентгеновская	БСВ-29 (Cu)
фильтр	Ni
высокое напряжение на трубке	20 кВ
анодный ток	20 мА
интервал штрихов отметчика	1 град
1-я у рентгеновской трубки	2×10 мм
2-я у рентгеновской трубки	1×10 мм
3-я у счетчика	0,5×10 мм
скорость поворота счетчика	8 град /мин

Для регистрации рентгеновского излучения применялся блок детектирования сцинтилляционный БДС-6-05.

Исследования структурно-фазового состояния проводили также с помощью рентгеновского дифрактометра ARLX'TRA.

ARLX'TRA – рентгеновский дифрактометр оснащен параболическим зеркалом, с помощью которого производят исследование тонких пленок с углом  $0,75\theta$ , с применением трубки с Cu-анодом и высокотемпературной приставкой AntonPaar, позволяющие осуществлять исследования непосредственно при температуре фазовых превращений различных веществ до температуры  $1600^{\circ}\text{C}$ .

ARL9900 Intellipower Workstation дает возможность проводить рентгенофлуоресцентный анализ элементов от В до U и рентгенофазовый анализ в диапазоне двойных углов  $2\theta$   $8,80^{\circ}$ , с применением трубки с Co-анодом.

Обработка данных, расчет концентраций фазового и последовательного анализа элементов, осуществляется с помощью программных комплексов: UniQuant 5.56, Siroquant version 3.0, ICDD DDVIEW 2010, ICDD PDF-2 Release 2010, Difwin, Crystallographica Search Match.

Полный химический анализ проводили по требованиям ГОСТ 5382-91. о результатам анализа определялось содержание кремния, железа (трех- и двухвалентного), алюминия, марганца, магния, кальция, натрия, калия, серы (сульфатной и сульфидной), хлоридов и потери массы при прокаливании (далее – п.п.п.).

Изучение микроструктуры сырьевых компонентов и материалов на их основе производилось с помощью растровой электронной микроскопии.

Сканирующая (растровая) электронная микроскопия (СЭМ, РЭМ) позволяет получить изображения объёмных электронно-плотных образцов с высоким разрешением путём их сканирования образцов тонко сфокусированным пучком электронов с энергией в диапазоне от нескольких сотен эВ до 50 кэВ с помощью системы отклоняющих катушек. Когда электроны сталкиваются с поверхностью и проникают в нее, происходит ряд взаимодействий, которые приводят к эмиссии электронов и фотонов из образца, и при попадании

эмитированных электронов в катодно-лучевую трубку в ней формируются СЭМ-изображения.

Для получения микрофотографий поверхности, размера зерен, микроструктуры затвердевших вяжущих и бетонов на их основе, а также для проведения локального микроанализа был использован сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения (до 1 нм) TESCAN MIRA 3 LMU, включающий энергодисперсионный спектрометр (ЭДС) X-MAX 50 Oxford Instruments NanoAnalysis для электронно-зондового микроанализа.

Основные технические характеристики микроскопа:

- возможность энергодисперсионного микроанализа (ЭДА, EDS);
- ускоряющее напряжение: от 200 В до 30 кВ с плавной регулировкой;
- система подачи напряжения на образец для получения изображений высокого разрешения при низких ускоряющих напряжениях от 50 В до 5 кВ;
- максимальное значение тока зонда – 200 нА;
- увеличение: от 4х до 1 000 000х.

Установленные детекторы:

- SE – детектор вторичных электронов типа Эверхарта-Торнли. Служит для получения изображений топографического контраста;

- R-BSE – выдвигаемый детектор отраженных электронов сцинтилляторного типа на основе высокочувствительного YAG кристалла с разрешением по атомному номеру 0.1Z. Служит для получения изображений композиционного контраста;

- LVSTD – детектор вторичных электронов типа Эверхарта-Торнли для режима низкого вакуума в камере. Служит для получения изображений топографического контраста в режиме низкого вакуума;

- система энергодисперсионного микроанализа Advanced Aztec Energy.

Для изучения свойств композиционных вяжущих осуществлялся помол наполнителей и вяжущего в лабораторной вибрационной мельнице MB-20, объем загрузки - 20 л. Объем загружаемого материала составлял 5 кг.

Удельную поверхность цементов определяли по методу воздухопроницаемости по ГОСТ 310.2–76 с помощью прибора ПМЦ – 500.

Вычисления производили по формуле (2.1):

$$S = K \frac{M\sqrt{t}}{m}, \quad (2.1.)$$

где  $S$  – удельная поверхность;  $k$  – постоянная прибора (указана в паспорте прибора);  $M$  – величина, зависящая от высоты слоя материала и температуры воздуха (табличное значение);  $t$  – время падения жидкости между рисками, с;  $m$  – величина навески, г.

Нормальную плотность и сроки схватывания цементного теста устанавливали при помощи прибора Вика согласно с ГОСТ 310.3–76 «Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема».

Предел прочности при изгибе и сжатии цемента определяли испытанием образцов-балочек размером 40x40x160 мм ГОСТ 310.4–81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии».

Для оценки таких ключевых характеристик бетонной смеси, применяемой в технологии 3D-печати, как способность сохранять форму и поддаваться формованию, были определены два показателя: несущая способность свежееуложенного слоя (что отражает его пластическую прочность и стабильность формы) — обозначается как П, а также реотехнологический индекс (РТИ), согласно положениям СТО 02066339-043-2020 «Смеси для получения композитов методом строительной печати на цементном вяжущем».

Показатель печатаемости растворных смесей устанавливается по глубине погружения поршня измерительного устройства при испытании на виброплатформе. Конструкция прибора для оценки реотехнологических свойств включает в себя коническую форму (1), внутрь которой свободно опускается поршень заданной массы (2). Перед началом испытания форма переворачивается и заполняется исследуемым составом с незначительным избытком, предотвращающим образование пустот. Поршень снабжен ограничителем,

исключающим его выпадение из формы во время заполнения. После этого устанавливается столик с отверстиями (3), через которые удаляется излишек смеси, обеспечивая полное заполнение объема. Затем форма и столик фиксируются между собой пружинными зажимами (4), и вся конструкция помещается на вибростол по ГОСТ 310.4-81 (рисунок 2.1). Значение РТИ определяется по глубине погружения поршня после проведения 30 виброциклов с частотой 1 Гц [125].

Оценка несущей способности свежесформованной смеси для строительной печати проводится по величине давления (в  $\text{г/мм}^2$ ), которое вызывает 10%-ную деформацию по высоте. Для этого применяется прибор Вика, дополненный специальными насадками. Фиксация момента формирования структуры осуществляется в минутах — с момента затворения до достижения состояния, при котором смесь выдерживает нагрузку, соответствующую 10-кратной величине её средней плотности, при допустимой деформации не более 10%.



Рисунок 2.1. – Основные этапы работы с прибором для определения реотехнологического индекса смесей

Общий вид системы для определения указанных показателей представлен на рисунке 2.2.

Для обеспечения достоверности измерений рекомендуется использовать измерительные формы различных типоразмеров, в зависимости от максимальной крупности используемого заполнителя. В данном исследовании использовались кубические ячейки с внутренним ребром 35 мм, что позволило проводить испытания на тонкодисперсных и мелкозернистых смесях с максимальной крупностью зерен до 2,5 мм.

Отличительным показателем технологических свойств самоуплотняющихся бетонных смесей служит такая характеристика, как подвижность, обусловленная значениями диаметра расплыва стандартного конуса и времени растекания бетонной смеси конуса до достижения диаметра 500 мм.

Для определения растекаемости смесей были произведены измерения диаметра расплыва конуса по Суттарду (рисунок 2.3).



Рисунок 2.2 - Комплект оборудования и приспособлений для определения несущей способности свежееотформованного слоя

Технологические свойства самоуплотняющихся бетонных смесей определены в соответствии с европейскими и американскими директивами по самоуплотняющимся бетонам (The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use; ACI 237R-07 Self-Consolidating Concrete).

Параллельно с определением необходимых значений диаметра расплыва конуса была установлена реологическая характеристика бетонной смеси. Данным параметром является условная вязкость, значение которой составило T500. Эти показатели были установлены по времени растекания смеси до момента достижения диаметра 500 мм (рисунок 2.4).



Рисунок 2.3 – Определение диаметра расплыва смеси (Flow spread S, мм)

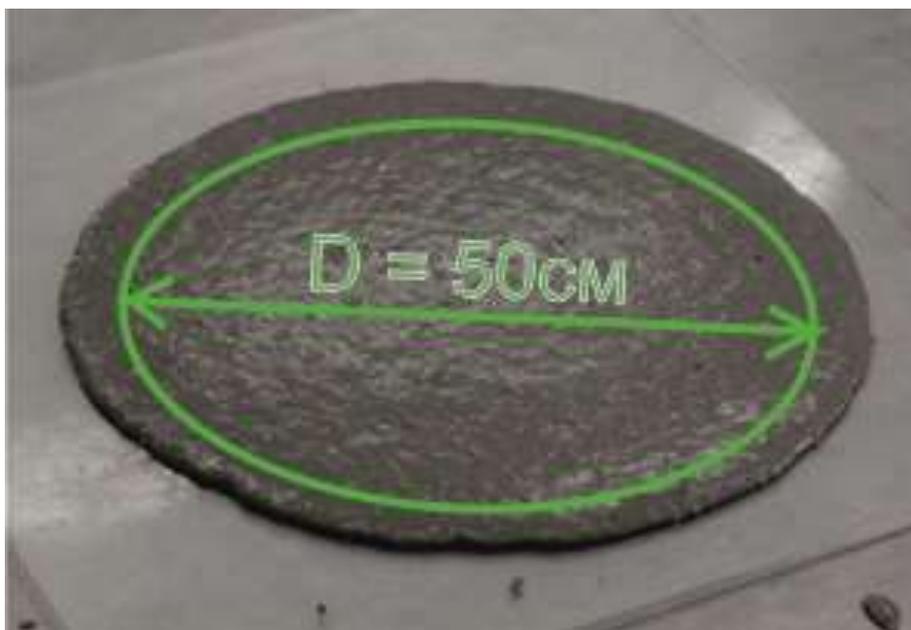


Рисунок 2.4– Определение времени растекания бетонной смеси (Slump flow time, T500, с)

## 2.2 Характеристика использованных материалов

Для проведения исследований использовался белый цемент: без минеральных добавок и добавок-наполнителей 1 сорта марки 500 (ПЦБ 1-500-ДО ГОСТ 965-89).

Физико-механические свойства, химический и минералогический составы белого цемента приведены в таблицах 2.1 -2.3.

Таблица 2.1

**Физико-механические свойства цемента ПЦБ 1-500-ДО ГОСТ 965-89**

Показатели	Нормированные значения	Фактические значения
Белизна, L	Не менее 80%	Более 92%
Тонкость помола	Не более 12%	0%
Сроки схватывания, начало	Не менее 45 мин	80-95 мин
Сроки схватывания, конец	Не более 600 мин	120-140 мин
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут	Не менее 49 МПа	Более 65 МПа
Предел прочности при сжатии после пропаривания	Не менее 32 МПа	Более 45 МПа
Нормальная плотность цементного теста	Не нормируется	30-32%

Таблица 2.2

**Химический состав цемента ПЦБ 1-500-ДО ГОСТ 965-89**

Цемент	Химический состав, % от массы						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
ПЦБ 1-500-ДО ГОСТ 965-89	21,2	5,2	0,2	66,6	1,0	23,4	0,1

Таблица 2.3

**Минеральный состав цементного клинкера**

Цемент	Фактический минеральный состав клинкера, %			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
ПЦБ 1-500-ДО ГОСТ 965-89	73,6	10,5	13,1	0,6

В качестве минеральной добавки в исследовании применялся тонкодисперсный мел МТД-1 (99% менее 16 мкм) (таблица 2.4).

**Технические характеристики мела МТД-1**

Отпуск с производства	МКР
CaCO <sub>3</sub> и MgCO <sub>3</sub> , %, не менее	98 — 99
Вещества нерастворимые в HCl, %, не более	0,6 — 1,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> и Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %, не более	0,3 — 0,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %, не более	0,08 — 1,2
Влаги, %, не более	0,25
Остаток на сите №0045, %, не более	0,01 — 0,02
Частица менее 5,0 мкм, %, не менее	87.1
Частица менее 10,0 мкм, %, не менее	98.2
Частица менее 25,0 мкм, %, не менее	99.6
Частица менее 40,0 мкм, %, не менее	99.9

В качестве мелкого заполнителя в проводимых исследованиях применялся кварцевый песок, прошедший предварительную промывку. Гранулометрический состав и модуль крупности песка из месторождения Безлюдовка представлены в таблице 2.6. Анализ минерального состава исходного заполнителя показал, что основной минералогической составляющей используемого песка выступает кварц ( $\beta$ -SiO<sub>2</sub>), что также подтверждается данными, приведёнными в таблице 2.6.

В качестве вяжущего вещества использовался портландцемент марки ПЦБ 1-500-ДО, соответствующий требованиям ГОСТ 965–89. Согласно результатам анализа, минеральный состав цементного клинкера включает: C<sub>3</sub>S — 73,6 %, C<sub>2</sub>S — 10,5 %, C<sub>3</sub>A — 13,1 %, C<sub>4</sub>AF — 0,6 %. Использованный микрокальцит (МКР) характеризуется высокой степенью чистоты — содержание карбонатов кальция и магния (CaCO<sub>3</sub> и MgCO<sub>3</sub>) составляет не менее 98–99 %.

### Зерновой состав песка Безлюдовского месторождения

Показатели	Размер отверстий сит, мм						Проход сквозь сито № 0,14
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
Остатки на ситах, г:	6,9	20,30	38,64	104,3	273,98	452,5	103,38
частные, %	0,69	2,03	3,86	10,4	27,4	45,3	10,32
полные, %	0,69	2,72	6,58	16,98	44,38	89,68	100
Плотность упаковки	0,60	0,61	0,62	0,63	0,61	0,58	0,56
Модуль крупности песка	$M_{кр} = 1,71$						

Содержание кальцита в исследуемом материале ( $CaCO_3$ ) не превышает 5 % (таблица 2.6).

Таблица 2.6

### Минеральный состав кварцевого песка

Название	Формула	Условная концентрация, %
Кварц	$SiO_2$	95,2
Кальцит	$CaCO_3$	4,8

В таблице 2.7 представлены основные физико-механические характеристики отсева дробления КВП, используемого для проведения научных исследований.

Таблица 2.7

### Физико-механические характеристики отсева дробления КВП в естественном виде

Наименование показателя	Отсев дробления КВП
Модуль крупности	3,55
Насыпная плотность в неуплотненном состоянии, $кг/м^3$	1410
Насыпная плотность в уплотненном состоянии, $кг/м^3$	1490
Истинная плотность, $кг/м^3$	2,71
Пустотность, %	45,8
Водопотребность, %	5,3
Цементопотребность	0,530

Основным минералом КВП, относящегося к метаморфическому генезису, является кварц зеленосланцевой степени метаморфизма.

Таблица 2.8

### Минеральный состав отсева дробления КВП

Формула	Содержание, %
SiO <sub>2</sub>	88,1
CaCO <sub>3</sub>	1,7
Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ·2SiO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	1,7
K <sub>2</sub> O·3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6SiO <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	6,4
NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	3,3

Таблица 2.9

### Химический состав отсева дробления КВП, %

Содержание оксидов по массе, %											
SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> своб	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	п.п.п.
94,32	88,9	2,61	0,42	0,81	0,66	0,22	0,65	0,01	0,16	0,46	0,65

Для приготовления фибробетона применялся суперпластификатор Реопласт ПКЭ-1230 для высокотехнологичных товарных бетонных смесей и смесей, используемых при производстве ЖБИ.

Реопласт серии ПКЭ — суперпластифицирующие добавки в бетон, регулирующие пластичность, плотность, связность, сохраняемость и удобоукладываемость бетонных смесей. Они ускоряют набор прочности в ранние сроки, эффективны при тепловлажностной обработке (ТВО), позволяют снизить температуру и/или продолжительность тепловой обработки. Продукты для товарных бетонов отлично подходят для бетонирования в условиях сухого и жаркого климата, а также повышают технологичность бетонной смеси, обеспечивая отличную удобоукладываемость и уплотняемость, улучшают качество поверхности конструкций и изделий, позволяют получать качественные бетонные смеси без расслоения и водоотделения как на мелких, так и на крупных песках, увеличивают прочность бетона до 40 % за счет снижения водоцементного отношения при заданной подвижности, при заданном

водоцементном отношении повышают подвижность с П1 до П5 при оптимальной дозировке (ТУ 5745-002-25842763-2014, ГОСТ 24211, ГОСТ 30459).

Технические характеристики стеклофибры (ТСК «Эко-плюс»):

диаметр — 15 мкр;

длина — 30 мм;

плотность — 2,6 г/см<sup>3</sup>;

прочность — 500 МПа;

внешний вид — белые волокна;

прочность на растяжение — 1400 МПа.

### 2.3 Выводы

1. Приведены методы исследований при помощи сертифицированного и метрологически поверенного лабораторного оборудования; современных методов растровой электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и стандартных методик - были изучены составы и микроструктура сырьевых и разработанных материалов, а также технологические и реологические свойства смесей. Применение данных методик в научных исследованиях позволяет провести детальный анализ ВКВП как компонента вяжущих систем.

2. На основании химических, минералогических, физико-механических характеристик были подобраны рациональные материалы для проведения исследований, позволяющие эффективно изучить особенности процессов фазо- и структурообразования при гидратации и твердении КВ с использованием активных минеральных добавок и получить составы мелкозернистых бетонов для МАФ с требуемыми декоративными и эксплуатационными показателями.

3. Для оценки влияния различного состава компонентов — вяжущего вещества, в том числе минеральных добавок КВП зеленосланцевой степени метаморфизма, подготовленного геологическими процессами, и наполнителей

— на свойства бетонных смесей и бетонов, были использованы методы математического моделирования и планирования эксперимента.

### **3. КОМПОЗИЦИОННЫЕ ВЯЖУЩИЕ ДЛЯ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫВЕТРЕННЫХ КВАРЦИТОПЕСЧАНИКОВ**

Цементная промышленность сталкивается с глобальными и локальными экологическими проблемами, связанными с энергоемкостью производства и необходимостью сокращения выбросов CO<sub>2</sub>. В условиях повышенного внимания к устойчивому развитию необходимо правильно оценивать влияние производства цемента на окружающую среду, особенно при разработке новых экологичных видов бетона.

Во многих исследованиях для оценки воздействия производства цемента на окружающую среду и поиска способов улучшения экологических показателей применяется такой способ, как оценка жизненного цикла. Цель данного исследования — проанализировать воздействие производства портландцемента на окружающую среду в контексте системы «от колыбели до ворот», начиная с добычи сырья и заканчивая процессом производства цемента как основного продукта. Итоги данного мониторинга показывают, что производство цемента воздействует на атмосферу в результате выбросов CO<sub>2</sub>.

Еще одним важным аспектом в экологической составляющей производства портландцемента является утилизация промышленных отходов. Применение мрамора, гранита, песчаника и других горных пород в качестве сырья для производства строительных материалов возросло, а утилизация продуктов добычи представляет собой серьезную проблему. Ежегодно образуются миллиарды тонн промышленных отходов, которые необходимо использовать в качестве сырья для строительных материалов.

Таким образом, применение техногенного сырья в качестве минеральной добавки в бетоне может иметь благоприятные перспективы и принести большую пользу с точки зрения экологии и устойчивого развития, особенно это актуально для Белгородской области, на территории которой расположен самый крупный в

мире железорудный бассейн, где разрабатываются Лебединское и Стойленское месторождения [126-129].

### **3.1 Свойства выветренных кварцитопесчаников Лебединского горно-обогатительного комбината как компонента вяжущих систем**

Промышленность строительных материалов отличается от других отраслей консервативностью в использовании сырья. Уже несколько столетий основными горными породами, которые применяются для производства щебня, материалов автоклавного твердения, портландцементного клинкера, керамических материалов, являются граниты, пески, известняки и глины. Используемое в настоящее время традиционное сырье изучалось и развивалось 30–50 лет назад для производства композитов с прочностью до 30–50 МПа, и требования к нему были соответствующие. Это привело к высокой энергоемкости производства строительных материалов и росту транспортных расходов. Становление строительного материаловедения, развитие горнодобывающей промышленности, а также специфика геологического строения территории Российской Федерации ориентируют на поиск новых видов сырья, которое лучше подготовлено геологическими и техногенными процессами для производства того или иного строительного материала. Поиск нового вида сырья является задачей мирового уровня. Именно этим объясняется возросшее количество публикаций по исследованию возможности использования в стройиндустрии природных конгломератов, породообразующими минералами которых являются термодинамически активные: опал, цеолиты, смешанослойные образования, метаморфогенный кварц, а также сырье, представленное в основном стеклофазой [130-134].

По данным ЮНЕСКО в мире ежегодно извлекают из недр более 120 млрд тонн руд, горючих ископаемых и другого сырья. В России ежегодно образуется свыше 5 млрд тонн отходов, а в отвалах и хранилищах горнодобывающей отрасли страны накоплено около 60 млрд. тонн твердых отходов. Проблема

применения отходов приобрела планетарный характер. Существенно возрастает актуальность использования техногенного сырья. Процесс комплексного применения недр в стройиндустрии затруднен, так как попутнодобываемые породы и отходы промышленной переработки рудных полезных ископаемых существенно отличаются от традиционного сырья по генезису, минеральному составу, структуре и текстуре. Это объясняется тем, что экономически целесообразная глубина карьера по добыче сырья для стройиндустрии составляет около 100 м, а рудные месторождения разрабатываются до 500 м и более. В зону горных работ при этом попадают миллиарды тонн нетрадиционных для стройиндустрии пород, исследование и применение которых требует особых подходов и решений.

Белгородская область находится на территории Курской магнитной аномалии (КМА), где расположен Лебединский горно-обогатительный комбинат, имеющий карьер по добыче железистых кварцитов диаметром примерно 5 км, глубиной более 500 м (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Открытый способ разработки Лебединского горно-обогатительного комбината КМА

КМА – крупнейший в мире железорудный бассейн по разведанным запасам богатых руд и железистых кварцитов, запасы которых составляют сотни миллиардов тонн.

Кафедрой строительного материаловедения БГТУ им. В.Г. Шухова под научным руководством доктора технических наук В. С. Лесовика был выполнен цикл работ по комплексному использованию отходов горнорудного производства. На основании этого утверждены запасы вскрышных и попутнодобываемых пород железорудных месторождений КМА.

Благодаря утверждению запасов КМА стройиндустрия Белгородской области обеспечена на столетия КВП, щебень из которого является эффективным наполнителем бетонов (таблица 3.1).

Таблица 3.1

### Объемы сырья стройиндустрии Белгородской области

Порода	Категория	Запасы по состоянию, тыс. м <sup>3</sup>		
		Утвержденные запасы	Запасы 01.01.97 г.	Остаток по разработанным месторождениям
Разведанные запасы				
Лебединское месторождение				
Метаморфические сланцы	B+C <sub>1</sub>	169072	156825	156495
Кварцитопесчаники	B+C <sub>1</sub>	196026	191110	191008
Стойленское месторождение				
Метаморфические сланцы	B+C <sub>1</sub>	241366	238839	238839
Приоскольское месторождение				
Метаморфические сланцы	C+C <sub>2</sub>	47842,3	-	-
Коробковское месторождение (Сретенский участок)				
Кварциты	B+C <sub>1</sub>	738582	-	-
Коробковское месторождение (Сретенский участок)				
Метаморфические сланцы	A+ B+C <sub>1</sub>	2163,8	-	-
Висловское месторождение				
Бокситы	A+ B+C <sub>1</sub>	1453	-	-

Кварцитопесчаники, утвержденные Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых, относятся к зеленосланцевой степени метаморфизма с породообразующим минералом кварца, отличающимся

дефектной структурой кристаллической решетки. Доказано, что применение КВП для получения композиционных вяжущих позволяет существенно снизить расход портландцемента, что актуально при решении задач снижения глобальной антропогенной эмиссии парниковых газов.

Мощность зоны выветренных ВКВП составляет от 20 до 50 м. По основным физико-механическим свойствам (прочность, морозостойкость и т.д.) эта порода не соответствует нормативным документам для получения щебня, поэтому она не внесена в сырьевую базу и ее запасы не утверждены Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых.

Выветривание - это сложный комплекс экзогенных процессов, открытая термодинамическая система, в которой происходят механические, физические, химические и биологические процессы преобразования горных пород в условиях поверхностной части литосферы.

При выветривании происходит разрушение текстуры и структуры исходных горных пород за счет целого комплекса гипергенных процессов, в том числе неравномерного нагрева и охлаждения. Различные породообразующие минералы имеют неодинаковые коэффициенты теплового расширения, поэтому при изменении температуры они испытывают деформации в различной степени в результате длительного воздействия колебаний температуры, а также других факторов (например, замерзание и оттаивание в микротрещинах воды и т.д.) КВП распадаются на отдельные обломки.

Визуально породы КВП характеризуются средне- и мелкозернистым сложением (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Разновидности кварцитопесчаников:

*а* – незатронутый процессами выветривания; *б* – выветренный

При этом порода не выветренного кварцитопесчаника (НКВП) имеет серую окраску со светлыми прожилками (рисунок 3.2, а). Породам выветривания присущ сахаровидный облик с розовато-серой окраской. Эта разновидность отличается более блеклой окраской и отсутствием специфического блеска (рисунок 3.2, б).

На основании микроскопического анализа, проведенного на цифровом микроскопе Axio Scope.A1, КВП незатронутый процессами выветривания, сложен зернами, каемки которых представлены в виде темных червеобразных микроборозд (рисунок 3.3, а). Приобретение светлых оттенков породы свидетельствует о влиянии процессов выветривания, что наблюдается на рисунке 3.2, б. Выветренная порода сложена обломочными зернами кварца. Это согласуется с литературными данными из геологии, где отмечается, что в результате процесса выветривания поверхность кварца покрывается сетью параллельных микротрещин, разбивая поверхность кристаллических частиц. На таких раздробленных поверхностях кремнезем легко подвергается растворению и переотложению в виде аморфных корочек, в результате чего зерна становятся округлыми. В условиях высоких рН в процессе диагенеза на кварцевых зернах образуются многочисленные ямки, создающие матовую поверхность зерен и прослеживаются контуры цементации минеральных зерен в виде регенерационной каймы. На поверхности обломочных зерен кварца наблюдаются многочисленные зародышевые, иногда глобулярные, образования, соединенные между собой мостиками, между этими образованиями остаются пустоты. Именно эти пустоты формируют линию, заполненную минералообразующей средой предположительно аморфной фазы. Помимо этого, в пространстве породы наблюдаются точечные включения рыжего цвета, вероятно, принадлежащие соединениям гидроксида железа.

Изучение фазовой структуры КВП проводили по РФА. Использовали рентгеновский дифрактометр ARL X'TRA. В КВП высокая степень кристалличности основных дифракционных пиков принадлежит кварцу (рисунок 3.4, а, б).

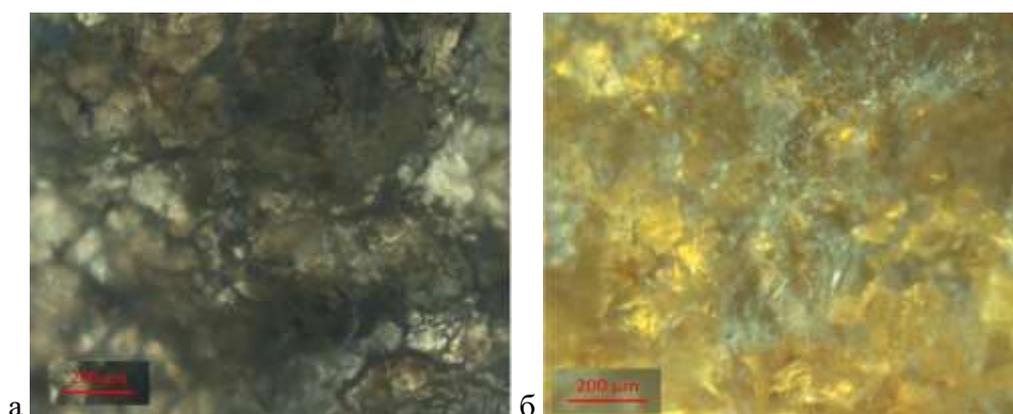


Рисунок 3.3 – Пластины породы кварцитопесчаника толщиной 0,5 мм:

*a* – незатронутый процессами выветривания; *б* – выветренный

Максимальные отражения дифракционных максимумов в КВП характерны для альфа-кварца  $\alpha\text{-SiO}_2$ . Из кристаллических фаз также присутствует небольшое количество альбита  $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$ . Согласно литературным данным, кремнезем в раздробленных поверхностях ВКВП легко подвергается растворению и переотложению в виде аморфных образований. Данный факт подтверждается рентгенограммой, где отмечается снижение дифракционных отражений кварца (рисунок 3.4 б). Диффузные гало в ВКВП при  $11\text{--}16^\circ 2\theta$  и  $27\text{--}29^\circ 2\theta$  указывают на появление аморфных фаз кремнезема в процессах выветривания.

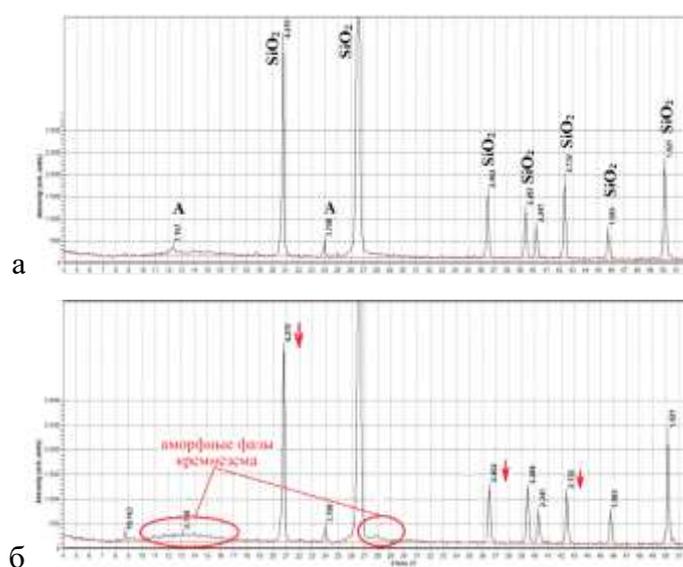


Рисунок 3.4 – Рентгенограмма кварцитопесчаников:

*a* – незатронутый процессами выветривания; *б* – выветренный.

$\text{SiO}_2$  – альфа-кварц  $\alpha\text{-SiO}_2$ ; А – альбит  $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$

Таким образом, данные РФА подтверждают наше предположение о том, что каемка между частицами обломочного кварца представлена цепочкой аморфных минеральных фаз. Отмечается также неустойчивость к процессам выветривания минералов полевых шпатов, интенсивность отражений которых снижается в отличие от разновидности, незатронутой этими процессами (рисунок 3.4, б). Данная порода существенно отличается по свойствам от НКВП, запасы которого утверждены в качестве сырья для получения щебня (таблица 3.2).

Таблица 3.2

### Сравнительные показатели кварцитопесчаников

Показатель	Не выветренный	Выветренный
Истинная плотность $\rho_{\text{ист}}$ , кг/м <sup>3</sup>	2650	2600
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	2630	2290
Пористость, %	0,91	17
Предел прочности при сжатии, МПа	145	89
Морозостойкость, циклы	250	20

Таким образом, несмотря на то, что в целом КВП давно утверждены Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых и внесены в сырьевую базу, имеется зона ВКВП от 20 до 50 м, не утвержденная этой комиссией из-за не соответствия породы по основным физическим свойствам нормативным документам для получения щебня. Проведенные исследования показали, что в результате процесса выветривания поверхность кварца покрывается микротрещинами, разделяя поверхность кристаллических частиц и формируя пустоты, заполненные аморфной фазой. При этом предел прочности при сжатии у выветренной породы уменьшается почти в 2 раза, морозостойкость снижается в 12 раз, а пористость возрастает в 18 раз.

### 3.2 Изучение особенностей гранулометрического состава молотых кварцитопесчаников и свойств композиционных вяжущих на их основе

Для возможности использования ВКВП в композиционных вяжущих в качестве минеральной добавки изучали кинетику помола КВП в трубной шаровой мельнице при 30 об/мин в течение 30 мин. В первые 10 мин помола пробы отбирали каждые 2 мин для определения удельной поверхности, далее – каждые 10 мин. Согласно представленному на рисунке 3.5 графику, динамика повышения удельной поверхности ВКВП значительно опережает аналогичный показатель у не выветренного.

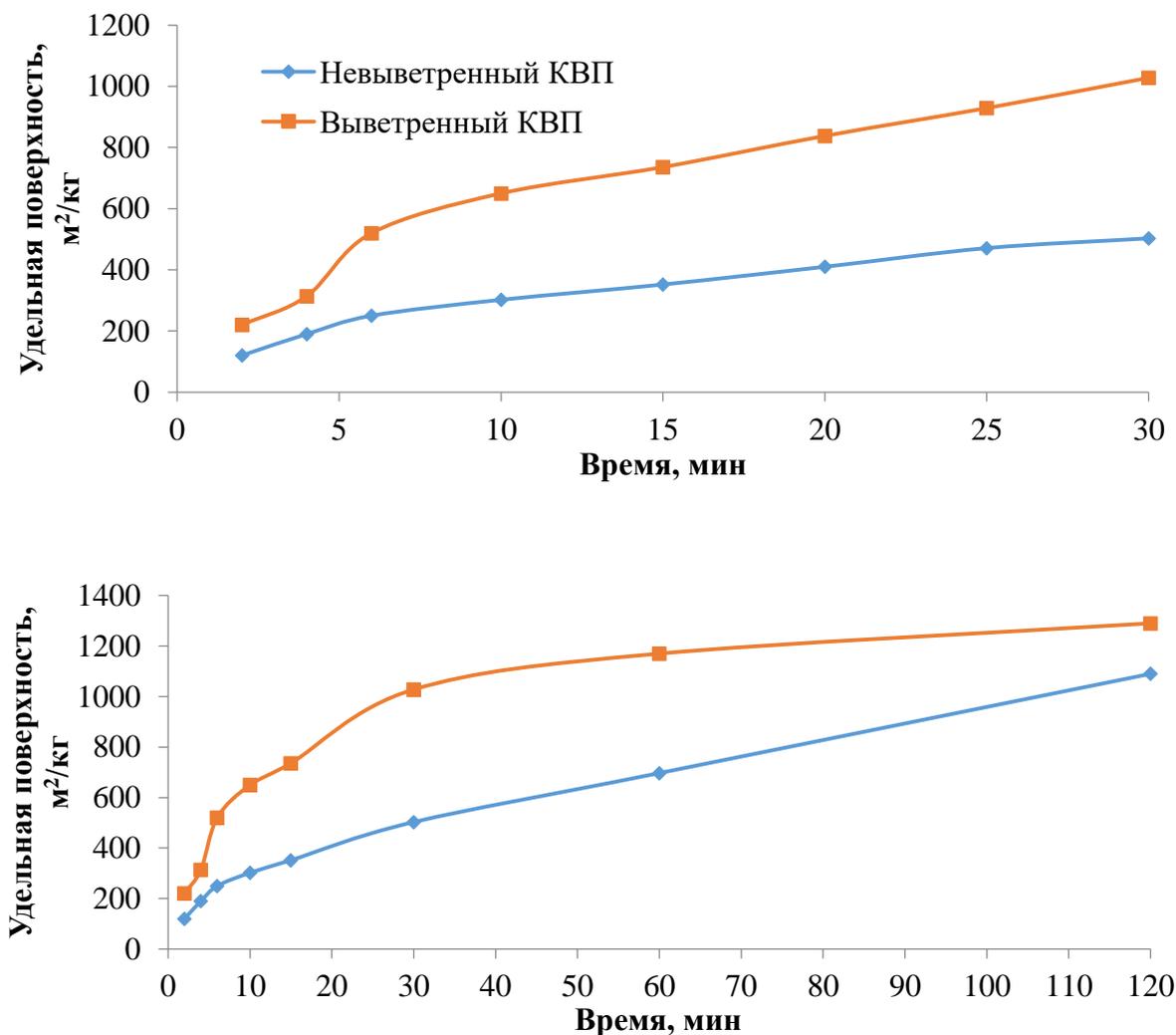


Рисунок 3.5 – Кинетика помола кварцитопесчаников

В течение 30 мин помола удельная поверхность ВКВП составила 1000 м<sup>2</sup>/кг, а в случае НКВП за это время достигается только 500 м<sup>2</sup>/кг.

При продолжении помола удельная поверхность НКВП 1000 м<sup>2</sup>/кг была зафиксирована лишь через два часа от начала эксперимента. В целом процесс помола ВКВП идет значительно эффективней по сравнению с невыветренным. Это объясняется наличием микротрещин, пор и пустот, а также наличием более дефектной аморфной фазы в породе. Данный факт дает существенную экономическую эффективность в масштабе промышленного производства строительных материалов.

Однако при помоле важна не только скорость достижения определенной удельной поверхности, но и получаемый гранулометрический состав материала. Так, при одной и той же удельной поверхности грансостав может быть различным. Поэтому далее в работе был изучен гранулометрический состав размолотых до удельной поверхности 300, 500 и 700 м<sup>2</sup>/кг КВП (рисунок 3.6).

Анализ результатов показал, что у кривых и на выветренном, и на свежем КВП наблюдается схожий характер распределения частиц по размерам относительно друг друга, но со смещением в область более мелких частиц во всех случаях у графика на основе ВКВП. При помоле от 300 м<sup>2</sup>/кг до 700 м<sup>2</sup>/кг идет постепенный сдвиг кривых в более мелкий диапазон частиц. Также меняется характер самих графиков. Так, вначале при помоле до 300 м<sup>2</sup>/кг происходит увеличение пика в области 0,5–5 мкм. Заметно, что кривая грансостава НКВП смещена в сторону больших частиц. Это отражается и на среднем размере частиц, который составил 18 и 13 для НКВП и ВКВП соответственно.

Поэтому далее в работе определяли эффективность использования ВКВП как наполнителя композиционных вяжущих в количестве 20 и 50 % взамен цементной составляющей.

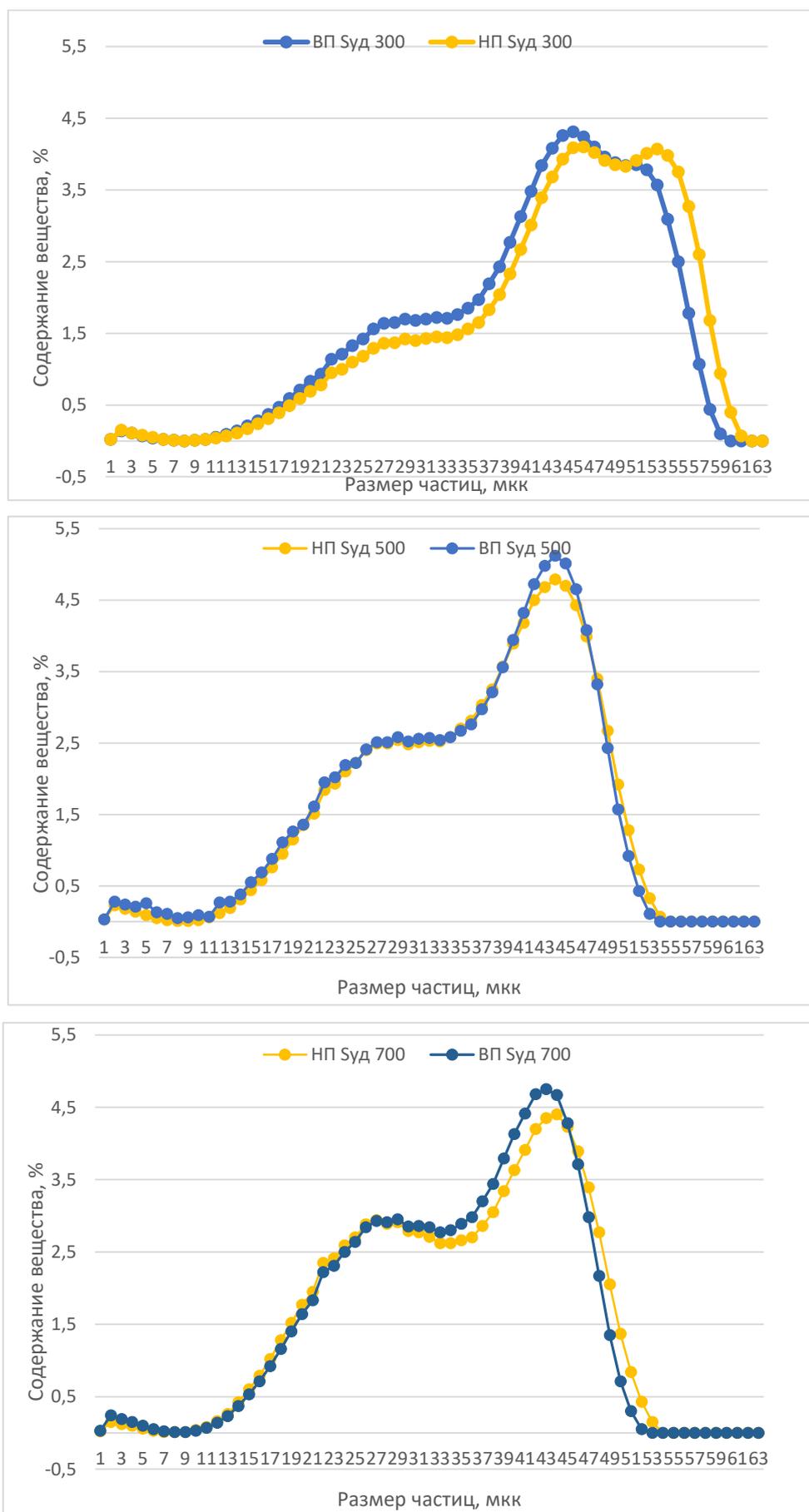


Рисунок 3.6 – Характер распределения частиц по размерам у тонкомолотого кварцитопесчаника

Для получения вяжущего был выбран отдельный помол компонентов, основываясь на предположении, что при совместном помолу цемента и минеральной добавки, происходит неконтролируемое увеличение удельной поверхности каждого из компонентов. Так, ВКВП, как установлено выше, измельчается быстрее НКВП, в результате это приводит к существенному увеличению его дисперсности в составе смешанного вяжущего, тогда как традиционный КВП может оказаться недомолотым при одинаковой удельной поверхности вяжущих, которая будет обеспечиваться за счет интенсификации помола цемента крупными частицами КВП, выступающими дополнительными мелющими телами. При этом для каждого вида добавок существует своя оптимальная дисперсность и, чтобы ее получить, их следует размалывать отдельно до оптимальной дисперсности и затем вводить в цемент.

Предварительно цемент ЦЕМ I 42,5 Н (АО «Себряковцемент»), нормальная густота цементного теста 26,7 %, был размолот до удельной поверхности 500 и 700 м<sup>2</sup>/кг. Минеральная добавка ВКВП вводилась размолотой до удельной поверхности 300, 500 и 700 м<sup>2</sup>/кг. Затем цемент смешивали с активными добавками и готовили образцы-кубики размером 3х3х3 см из теста нормальной густоты. Были определены показатели активности вяжущих в 28-ми суточном возрасте (таблица 3.3).

Установлено, что при возрастании удельной поверхности цемента с 500 до 700 м<sup>2</sup>/кг происходит увеличение активности у всех композиционных вяжущих. Однако такой эффект более значительно выражен у композиционных вяжущих с использованием ВКВП. Это объясняется большим содержанием аморфного кремнезема в составе такого КВП, который будет активнее реагировать с выделяющимся при гидратации гидроксидом кальция цементной матрицы, образуя низкоосновные гидросиликаты кальция второй генерации и уплотняя композит.

При удельной поверхности цемента  $S_{уд}^{цем} = 700$  м<sup>2</sup>/кг выше показатели активности у КВ20 с использованием активной добавки ВКВП, размолотой до  $S_{уд} = 700$  м<sup>2</sup>/кг.

### Влияние кварцевого сырья на прочность композиционного вяжущего

№ п/п	Состав (вяжущее)	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг		Активность вяжущего, МПа	
		ПЦ*	КВП*	НКВП*	ВКВП
1	КВ20*	500	300	46,9	49,1
			500	54,1	57,5
			700	55,5	58,5
2		700	300	58,3	60,7
			500	59,8	62,1
			700	59,2	65,5
3	КВ50*	500	300	32,6	34,3
			500	46,5	49,2
			700	45,0	50,3
4		700	300	49,5	50,3
			500	52,3	53,4
			700	52,9	53,8
5	ПЦ	300	-	55,2	

\*КВ20 (50) – замена цемента на 20 и 50 % кварцитопесчаником

Анализ показателей активности вяжущих с 20% ВКВП в составе показал, что при удельной поверхности цемента  $S_{уд}^{цем} = 700 \text{ м}^2/\text{кг}$  увеличение удельной поверхности минеральной добавки ВКВП до  $700 \text{ м}^2/\text{кг}$  является нецелесообразным с точки зрения энергоемкости процесса, поскольку не приводит к существенному возрастанию активности вяжущих. Поэтому, наиболее рациональными показателям активности приняты вяжущие с 20% ВКВП в составе ( $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), при удельной поверхности цемента  $S_{уд}^{цем} = 700 \text{ м}^2/\text{кг}$ . При этом активность КВ с заменой 20% цемента на минеральную добавку ВКВП на 13% выше прочности ПЦ и на 17% выше по сравнению с минеральной добавкой на основе НКВП.

Повышение доли минеральной добавки в составе КВ до 50% даёт несколько иную картину. Активность вяжущих на НКВП во всех случаях оказывается значительно ниже, чем у контрольного цемента. В то же время у КВ50 с минеральной добавкой ВКВП показатели активности близки к цементным при удельной поверхности наполнителя  $500 \text{ м}^2/\text{кг}$  и  $700 \text{ м}^2/\text{кг}$  (таблица 3.3, рисунок 3.7).

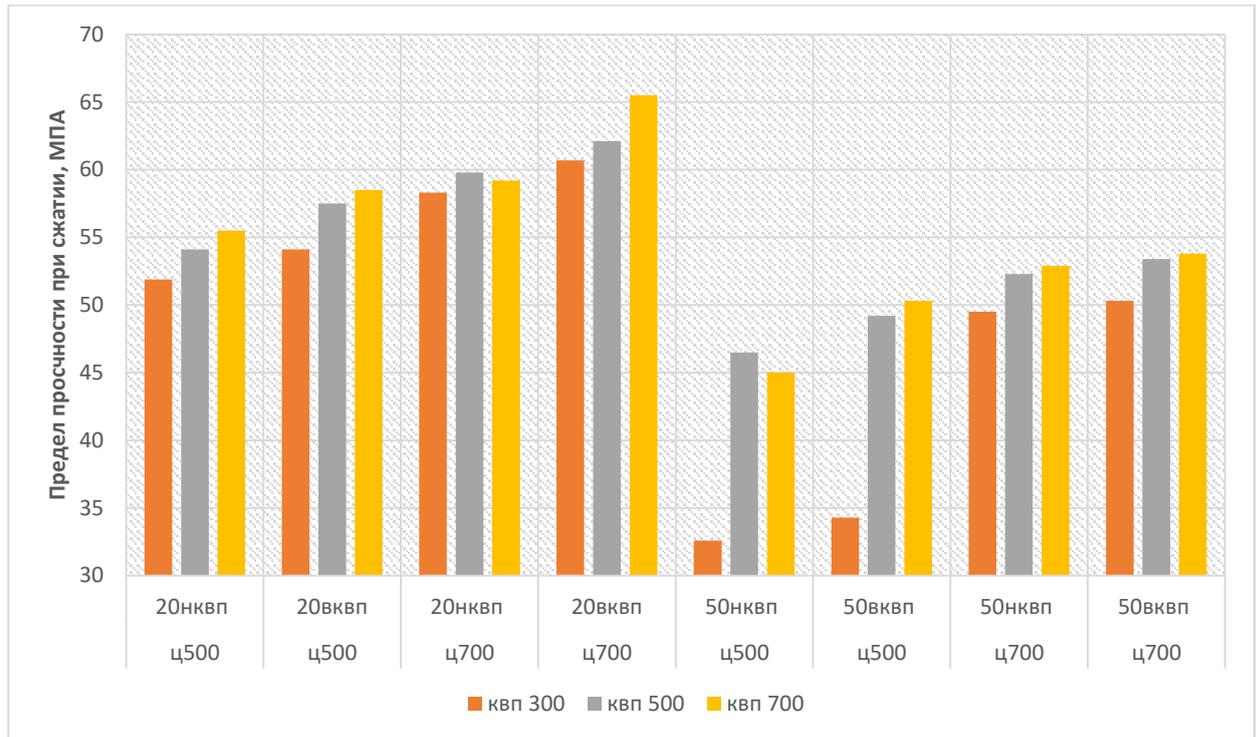


Рисунок 3.7 – Зависимость активности композиционного вяжущего от расхода наполнителя и удельной поверхности компонентов

Повышенное содержание тонкодисперсного наполнителя закономерно приводит к возрастанию водопотребности смеси, а также к тому, что большая его часть останется не прореагировавшей с выделяющимся гидроксидом кальция цементной системы. Это приводит к недобору возможной прочности и формированию более дефектной структуры композита (рисунок 3.8).

При сравнении показателей активности КВ на КВП и природном песке установлено, что повышение активности у КВ с заменой 20% (КВ20) на ВКВП составило 29 % по сравнению с КВ20 на песке, для КВ с заменой 20% на НКВП это превышение составило 19% (таблица 3.4).

Известно, что энергоёмкость помола песка выше, чем у НКВП, а в то же время затраты на помол ВКВП с  $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$  в 3,5 раза меньше, чем у НКВП (рисунок 3.5), что позволяет сделать выводы о высокой эффективности ВКВП как сырья стройиндустрии.

Также были изучены нормальная густота (НГ) и сроки схватывания КВ для установленной наиболее рациональной удельной поверхности КВП ( $S_{уд} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) и цемента ( $S_{уд} = 700 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) в сравнении с контрольным традиционным цементом ( $S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) (таблица 3.5).

Таблица 3.4

#### Показатели активности композиционного вяжущего

№ п/п	Состав (вяжущее)	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$		Активность вяжущего, МПа		
		ПЦ	КВП/Песок	НКВП	ВКВП	Песок
1	КВ20	700	500	59,8	64,1	49,7
2	КВ50	700	500	52,3	53,4	44,9

Таблица 3.5

#### Свойства композиционных вяжущих

Марка	Нормальная густота, %	Сроки схватывания, час:мин	
		начало	конец
ЦЕМ I 42,5Н	26,7	1:30	4:30
КВ20В	29,8	1:50	2:50
КВ20Н	28,2	1:45	2:35
КВ50В	34,7	2:05	3:20
КВ50Н	33,8	1:95	3:10

Установлено увеличение величины НГ КВ по сравнению с цементом во всех случаях. Однако вяжущие на основе ВКВП по сравнению с НКВП имеют более высокую НГ, что связано с их лучшей размалываемостью. Согласно полученным результатам, было принято решение далее применять КВ с 20% минеральной добавки ВКВП, как наиболее экономически и энергетически выгодные, и, имеющие наиболее высокие показатели активности.

Таким образом, теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность использования КВП, затронутых процессами выветривания, в качестве сырья стройиндустрии. Установлено, что процессы выветривания оказывают положительное влияние на процесс помола КВП.

Показатели активности КВ с использованием ВКВП во всех случаях имеют более высокие значения по сравнению с вяжущими на НКВП и природном кварцевом песке. Максимальное значения достигается у КВ с заменой 20% цемента на минеральную добавку ВКВП, которые превышают прочностные показатели цемента на 13%.

### **3.3 Анализ особенностей процессов фазо-и структурообразования при гидратации и твердении композиционного вяжущего**

Проведенное исследование микроструктуры образцов КВ20 на растровом электронном микроскопе Tescan MIRA 3 LMU показало, что адгезия цементного камня к частичкам КВП в обоих случаях высокая (рисунок 3.7).

Однако цементный камень более плотный у образца на основе ВКВП. Это можно объяснить более стесненными условиями прохождения реакций гидратации КВ 20В (КВ с 20% ВКВП) за счет наличия аморфных минеральных фаз кварца и соответственно более активно протекающего процесса гидратации путем связывания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при прохождении пуццолановой реакции с образованием гидросиликатов кальция второй генерации (рисунок 3.8). Вместе с этим тонкомолотые частицы КВП являются центрами кристаллизации и выступают наполнителем на микроуровне, совместно с более крупными частицами минерального компонента происходит более значительное заполнение межзернового пространства со снижением общего количества микротрещин.

Для КВ50 большое количество обладающих высокой дисперсностью частичек КВП приводит к возрастанию водопотребности смеси, и как следствие, к формированию более дефектной структуры композита, в том числе и из-за не прореагировавшей с выделяющимся гидроксидом кальция цементной системы какой-то части наполнителя (рисунок 3.7, д, е), что негативно сказывается и на активности.

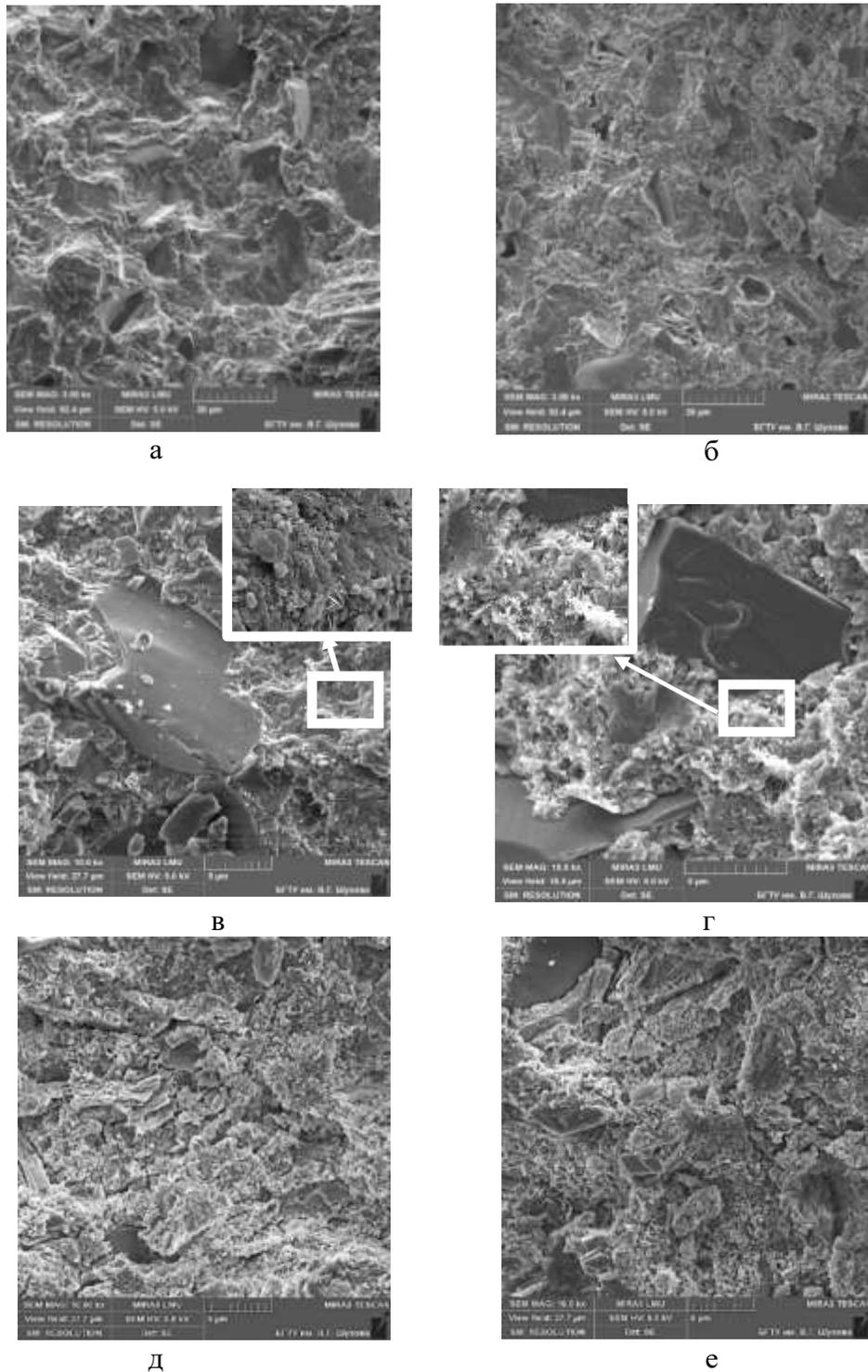


Рисунок 3.7 – Микроструктура затвердевшего композиционного вяжущего в 28-суточном возрасте: *а, в* – КВ 20В; *б, г* – КВ 20Н; *д* – КВ 50В; *е* – КВ 50Н

Изменение структуры фазового состава оценивали с помощью РФА для КВ20. Полученные данные также свидетельствуют о более полном связывании портландита с образованием дополнительных порций гидросиликатов кальция в основном низкоосновного типа у КВ 20В, поскольку интенсивность

дифференциальных отражений, характерных для  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , в вяжущем уменьшается при использовании выветренного КВП (рисунок 3.8, б).

У КВ 20В по сравнению с КВ 20Н (КВ с 20% НКВП) процессы растворения клинкерных минералов происходят более активно, что подтверждается снижением интенсивности пиков алита  $\text{Ca}_3[\text{SiO}_4]\text{O}$  и белита  $\text{Ca}_2[\text{SiO}_4]$ . (рисунок 3.8, б). Также высокая интенсивность дифракционных максимумов портландита в КВ 20Н и одновременное уменьшение отражений  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в КВ 20В подтверждает меньшую степень его взаимодействия в гидратируемой системе на НКВП и указывает на его связывание в гидратные новообразования CSH у КВ 20В (рисунок 3.8, б).

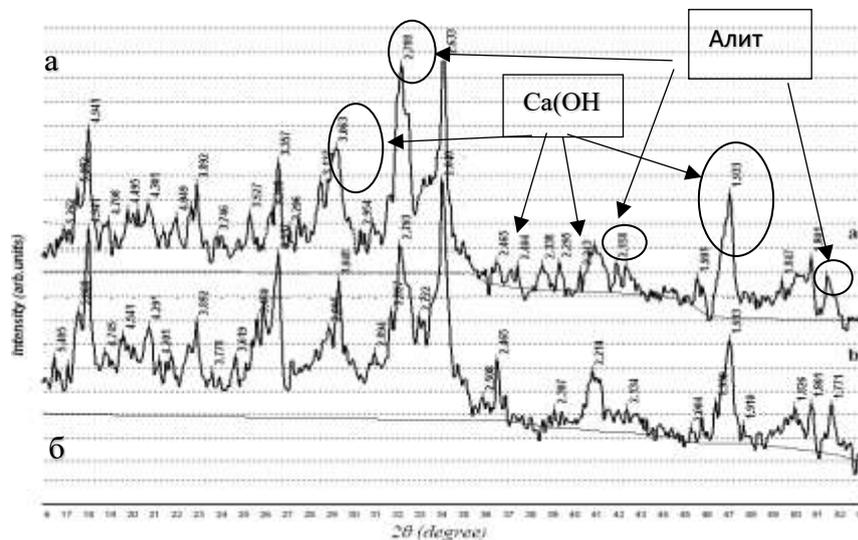


Рисунок 3.8 Рентгенограмма КВ20 через 28 суток твердения:

*а* – состав на НКВП; *б* – состав на ВКВП

Таким образом, при проведении комплексного анализа с привлечением методов РФА и СЭМ установлено, что образовавшиеся в процессах выветривания аморфные фазы кремнезема интенсифицируют гидратацию клинкерных минералов портландцемента за счет высокой пуццолановой активности, что ведет к связыванию портландита в низкоосновные гидросиликатные фазы. Показано, что применение ВКВП в составе КВ в количестве 20% позволяет существенно снизить долю цемента и энергоёмкость процесса помола с возможностью увеличения прочности готового композита.

### 3.4 Свойства вяжущих в зависимости от технологии производства минеральной добавки

Основываясь на полученных выше положительных результатах введения ВКВП в КВ, в работе была изучена возможность его использования в качестве активной минеральной добавки с использованием товарного цемента. Для выбора оптимальной удельной поверхности применяли размолотый в вибрационной мельнице ВКП до  $S_{уд}=300, 500$  и  $700 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Было исследовано влияние на прочностные свойства цементной системы различного количества вводимой добавки. В качестве исследуемых параметров поисковых экспериментов были выбраны:

- массовая доля тонкомолотого ВКП по отношению к цементу, %,  $x_1$ ;
- удельная поверхность минеральной добавки,  $\text{м}^2/\text{кг}$ ,  $x_2$ .

В качестве функции отклика была выбрана прочность на сжатие в возрасте 28 суток,  $R_{сж}$ , МПа.

По результатам поисковых экспериментальных исследований были определены следующие диапазоны варьирования факторов:

- массовая доля тонкомолотого ВКП  $x_1$  от 3 % с шагом варьирования 2 %;
- удельная поверхность минеральной добавки,  $\text{м}^2/\text{кг}$ ,  $x_2$  от 300 с шагом варьирования  $200 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Были заформованы образцы нормальной густоты размером  $3 \times 3 \times 3$  см. Матрица планирования, на основании которой проводились экспериментальные исследования, представлена в таблицах 3.6– 3.7. В соответствии с принятым планом проведения эксперимента установлено 2 уровня варьирования факторов:  $-1$  – минимальный;  $0$  – средний;  $+1$  – максимальный; (таблица 3.6).

В результате статистической обработки экспериментальных результатов были получены математические модели изменения прочностных показателей от количества вводимых добавок.

## Уровни варьирования факторов

№	Кодированный вид	Натуральный. вид	Диапазон варьирования			Шаг варьирования
			-1	0	+1	
1	X1	Количество микронаполнителя, %	3	5	7	2
2	X2	Удельная поверхность минеральной добавки, м <sup>2</sup> /кг	300	500	700	200

## Матрица планирования эксперимента

Точка плана	Матрица планирования		Квадраты переменных		Взаимодействие факторов	Активность (28 сут), МПа (НКВП)	Активность (28 сут), МПа (ВКВП)
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>		
1	+1	+1	+1	+1	+1	58,3	62,1
2	+1	-1	+1	+1	-1	44,5	43,8
3	-1	+1	+1	+1	-1	56,1	59,2
4	-1	-1	+1	+1	+1	48	49
5	+1	0	+1	0	0	55,5	56,8
6	-1	0	+1	0	0	56,1	55,4
7	0	+1	0	+1	0	58,4	59,4
8	0	-1	0	+1	0	39,9	41,5
9	0	0	0	0	0	59,1	56,9

Уравнение регрессии активности цементной композиции имеет вид:

$$R^{28}_{вквп} = 55,4 + 0,18x_1 + 8,1x_2 + 1,45x_1^2 - 4,2x_2^2 + 1,5x_1 \cdot x_2 \quad (3.1)$$

$$R^{28}_{нквп} = 56,3 - 0,23x_1 + 6,7x_2 + 0,56x_1^2 - 5,9x_2^2 + 1,4x_1 \cdot x_2 \quad (3.2)$$

Среднеквадратичное отклонение составляет 0,98, что свидетельствует об адекватности моделей.

Анализ математических моделей показал следующее:

- в уравнениях наиболее значимым фактором является удельная поверхность ( $x_2$ ), так как коэффициенты при  $x_2$  имеют максимальное

значение по абсолютной величине по сравнению с  $x_1$ . Знак «плюс» при  $x_2$  говорит о прямой взаимосвязи с активностью вяжущей системы и наоборот, «минус» при  $x_1$  для НКВП – об обратной;

- одинаковые знаки, стоящие перед линейным и квадратичным факторами при  $x_1$  у ВКВП свидетельствуют о возрастании прироста активности в указанном диапазоне изменения расходов наполнителя и о снижении при увеличении удельной поверхности. Знак «плюс» при произведении коэффициентов  $x_1$  и  $x_2$  говорит о том, что прочность бетона будет расти при увеличении расходов обоих компонентов (рисунок 3.9).

Анализ данных показал, что при увеличении удельной поверхности до  $700 \text{ м}^2/\text{кг}$  активность образцов будет также возрастать при всех расходах добавки. Максимальные значения достигаются при расходе наполнителя  $7\% S_{\text{уд}}=700\text{м}^2/\text{кг}$ . При этом характер нарастания неодинаков. Так, для образцов с ВКВП в диапазоне расхода добавки  $3-6\%$  показатели активности плавно увеличиваются до достижения удельной поверхности  $600 \text{ м}^2/\text{кг}$ , а далее стабилизируются и остаются постоянными в интервале удельной поверхности  $600-700 \text{ м}^2/\text{кг}$ . При дальнейшем повышении расхода наполнителя с  $6$  до  $7\%$  активность будет возрастать прямо пропорционально росту удельной поверхности добавки.

Для образцов на НКВП в диапазоне расхода добавки  $3-4,5\%$  активность максимально возрастает при повышении до удельной поверхности  $550-650 \text{ м}^2/\text{кг}$ , а потом немного снижается. При повышении расхода наполнителя от  $4,5$  до  $7\%$  активность растет с увеличением  $S_{\text{уд}}$  до  $600 \text{ м}^2/\text{кг}$ , а далее в диапазоне  $600-700 \text{ м}^2/\text{кг}$  остается неизменной.

При  $S_{\text{уд}}=300\text{м}^2/\text{кг}$  минеральную добавку целесообразно вводить в количестве  $3-4\%$  от массы цемента. Увеличение его количества до  $7\%$  приводит к снижению активности.

Поскольку результаты обработки эксперимента не выявили точки экстремума функций на ВКВП, а также НКВП при наибольшей удельной поверхности, было решено увеличить тонкость помола добавок и

проанализировать влияние помольных агрегатов (помол КВП в вибрационной и струйной лабораторных мельницах) на грансостав наполнителей и свойства цементных систем с их использованием.

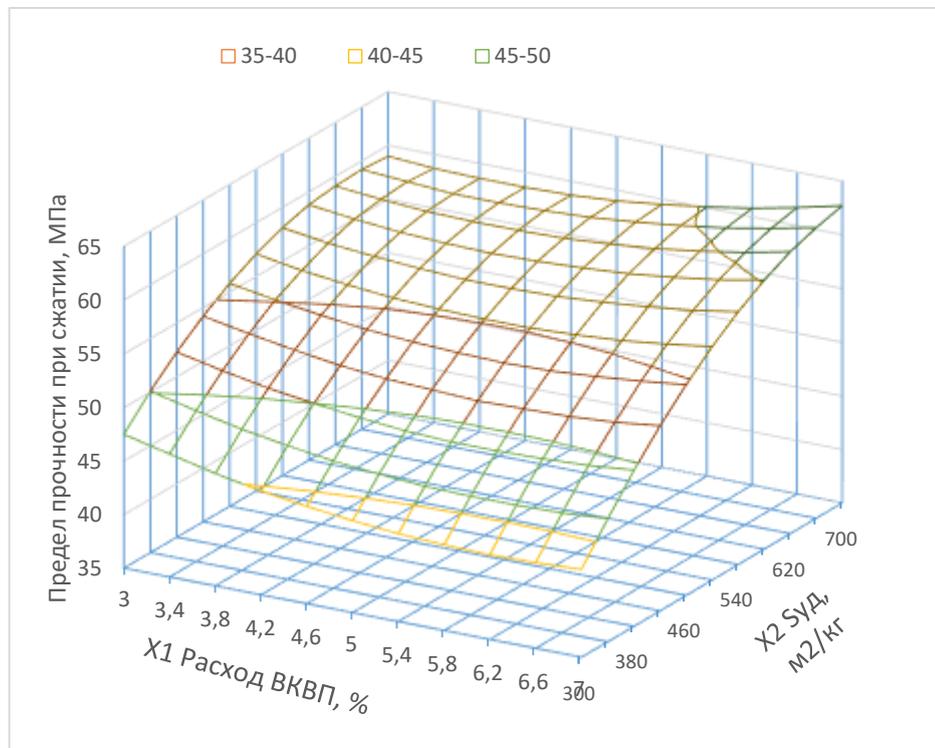
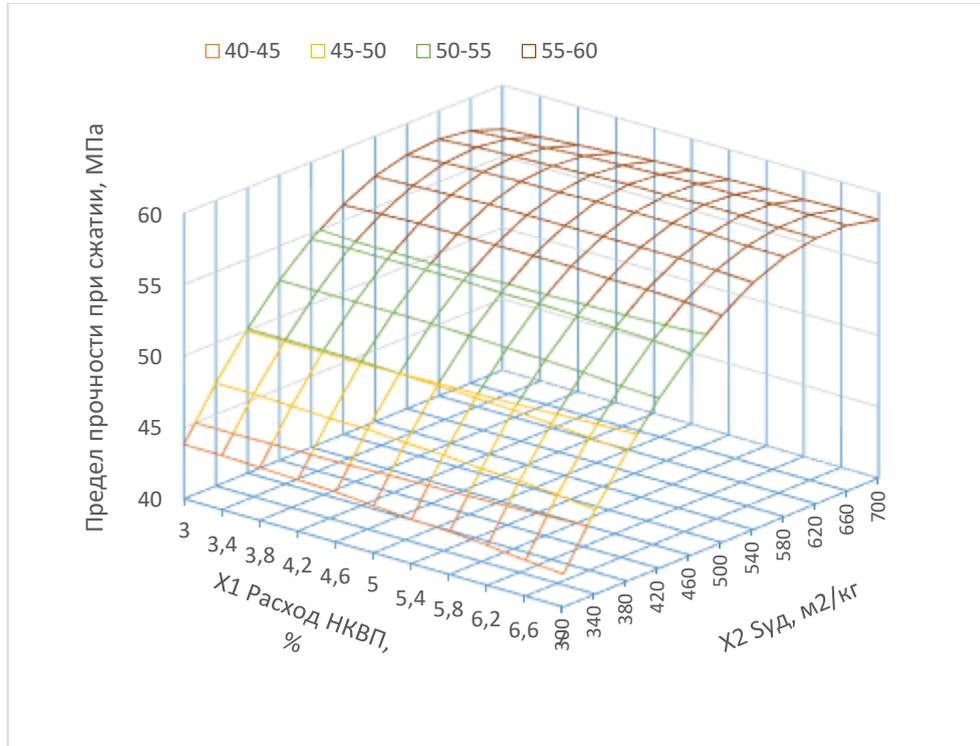


Рисунок 3.9 – Влияние удельной поверхности наполнителя и его количества на показатели активности цементной матрицы

В вибрационных мельницах вращение дебалансного вала побуждает мелющие тела двигаться под действием сил инерции. Мелющие тела внутри корпуса мельницы двигаются по сложной траектории, притираются к стенкам барабана, соударяются друг с другом и с частицами измельчаемого материала, при этом раскалывая и вдавливая их. При работе вибрационной мельницы наблюдается движение загруженного материала в направлении, противоположенном движению дебалансного вала. Частота вибрации корпуса мельницы соответствует частоте вращения электродвигателя.

Принцип действия струйных измельчителей основан на использовании энергии сжатого газа или пара. Энергоноситель при расширении в соплах приобретает большую скорость, достигающую иногда нескольких сотен метров в секунду. Частицы материала измельчаются вследствие соударения между собой при пересечении потоков струй, а также ударов и истирания о стенки камеры.

В ходе исследования были заформованы образцы-кубики 3х3х3 см из теста нормальной густоты. В вяжущее вводили активную минеральную добавку КВП в количестве 7, 9, 11, 13 % замены части цемента. Результаты экспериментов представлены в таблице 3.8.

По результатам проведенных экспериментов установлено, что значение активности образцов на ВКВП во всех случаях выше, чем на свежем КВП. Максимальной активностью обладали составы с 9% наполнителя, полученного при помоле на вибрмельнице (69 МПа), что на 18,5% выше, чем у обычного цемента (рисунок 3.10–3.11).

Для образцов, полученных в вихревой струйной мельнице наибольших показателей активности удалось достигнуть при введении 7% ВКВП (60 МПа). Однако дальнейшее увеличение расхода наполнителя приводит к снижению активности за счет возникновения микродефектов в цементной матрице при твердении композита, так как значительное возрастание доли мельчайших частиц будет способствовать как повышению водопотребности, так и

невозможности полного вовлечения в пуццолановую реакцию всех введенных в систему микрочастиц кремнезема.

Таблица 3.8

**Свойства вяжущих с использованием минерального наполнителя  
различного вида**

№	ПЦ %	КВП,		НГ, %	Сроки схватывания, мин		ρ, кг/м <sup>3</sup>	Активность вяжущего, МПа		
		вид	%		начало	конец		7	28	ТВО
0	100	–	-	26,7	90	270	2310	45,9	58,2	51
Помол КВП в вибрационной мельнице										
1	94	С	7	28,8	94	263	2130	48,0	60,1	52,8
		В		29,7	97	255	2135	48,5	64,2	59
2	91	С	9	30,1	95	250	2133	42	61,2	54
		В		31,2	97	248	2139	58	69	63
3	88	С	11	31,4	102	274	2137	49	55	50
		В		32,3	104	264	2140	51	59	53
4	85	С	13	32,8	112	297	2138	44	50	46
		В		33,2	119	277	2141	43	52	50
Помол КВП в струйной вихревой мельнице										
1	94	С	7	29,8	97	273	2125	51	58	49
		В		31,1	101	265	2128	55	60	54
2	91	С	9	31,9	108	293	2129	43	56	50
		В		32,8	112	285	2133	45	57	54
3	88	С	11	32,7	115	303	2131	45	52	45
		В		33,2	117	305	2140	49	54	55
4	85	С	13	34,8	122	309	2137	43	52,1	45
		В		35,5	123	315	2138	44	52,8	47

С-свежий КВП; В-выветренный КВП

В ходе анализа сроков схватывания установлено, что время начала схватывания вяжущих с минеральным наполнителем возрастает как в одном, так и в другом случае. Конец схватывания немного замедляется при увеличении вводимого наполнителя.

Также стоит отметить, что водопотребности смесей, полученных в вихревой струйной мельнице превышают аналогичные показатели в сравнении с составами, полученными в вибрационной мельнице, что, в итоге, отражается на активности. Это объясняется более интенсивной степенью измельчения материала в вихревой струйной мельнице и увеличения количества мельчайших фракций, полученных в ней (рисунок 3.12).

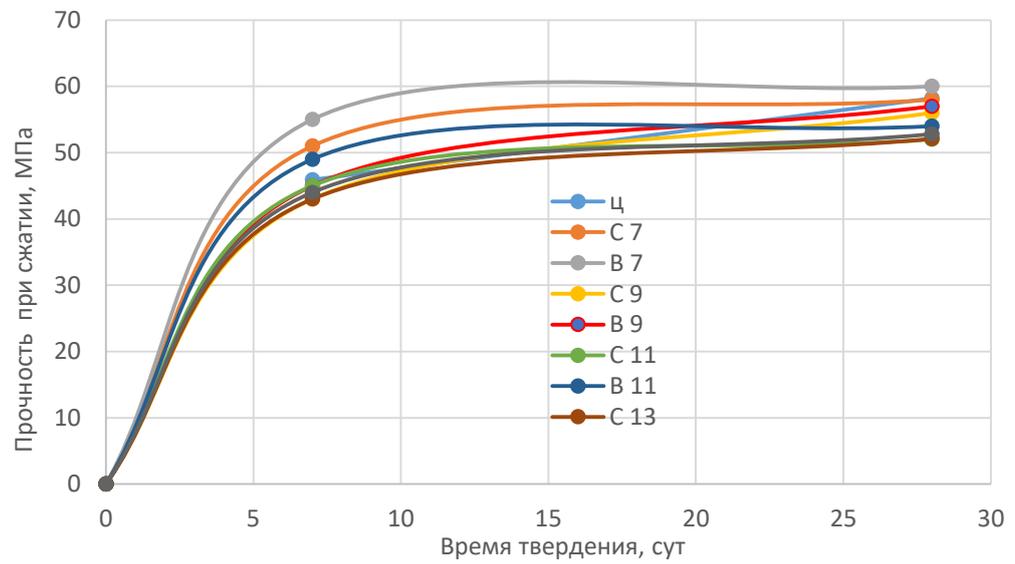
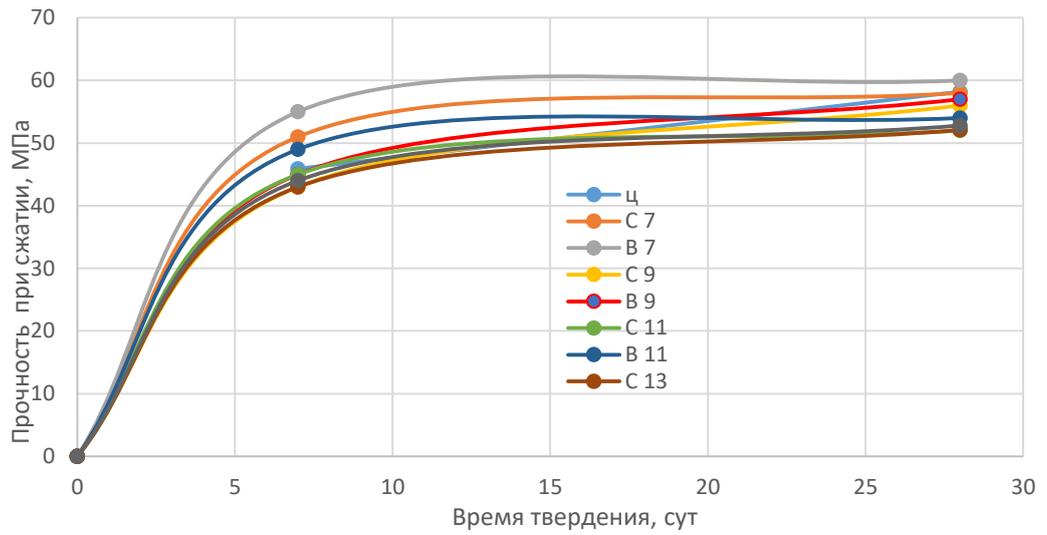
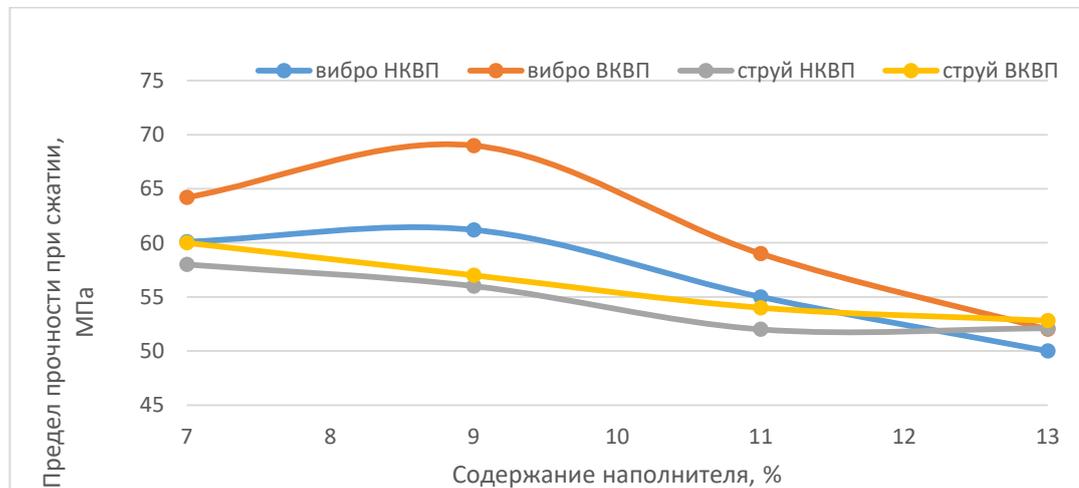


Рисунок 3.10 – Кинетика активности образцов с наполнителем,  $S_{уд}$  КВП=1000 м<sup>2</sup>/кг:

*а* – помол в вибромельнице, *б* – помол в струйной мельнице



Диапазон частиц полученных минеральных компонентов ВКВП с  $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$  в обоих случаях находится в интервале 30–70 мкм с двумя пиками в диапазоне 30–53 и 53–68 мкм (рисунок 3.12). Однако количество частиц в этих интервалах выявляется в прямо противоположных значениях: у наполнителя, полученного на струйной мельнице в диапазоне 30–50 мкм, пик возрастает, а в вибрационной – снижается от 3,5 до 4%, тогда как в интервале 55–68 мкм, наоборот, происходит возрастание частиц в первом интервале после помола в вибрационной мельнице и снижение во втором – после помола в струйной.

Процесс помола (истирание в вибрационной мельнице и удар в струйной) влияет на форму получаемых частиц. Так, более окатанная форма фиксируется у крупных частичек, полученных в вибромельнице, и более остроугольная – в струйной, что должно являться положительным фактором при твердении бетона. Однако при помоле до  $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$  количество крупных фракций минимально, а все мельчайшие частицы приобретают схожую более округлую форму как в первом, так и во втором случае (рисунок 3.13).

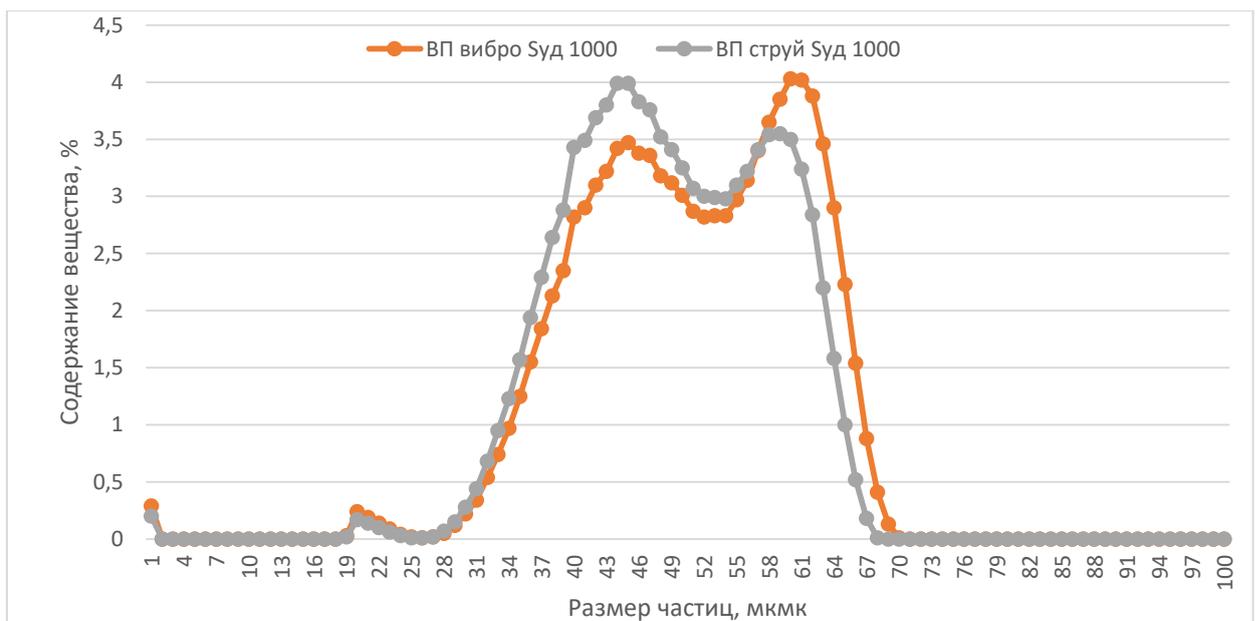


Рисунок 3.12 – Графики распределения частиц тонкомолотого ВКВП по размерам

В целом образцы с наполнителем ( $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), полученным на вибрационной мельнице обладают более высокими показателями прочности в сравнении с образцами с наполнителем, полученным на струйной вихревой мельнице, что связано с меньшим содержанием пылевидных фракций (рисунок 3.12) и, по всей видимости, рациональным соотношением более крупных и более мелких частиц в добавке (рисунки 3.13, 3.14).

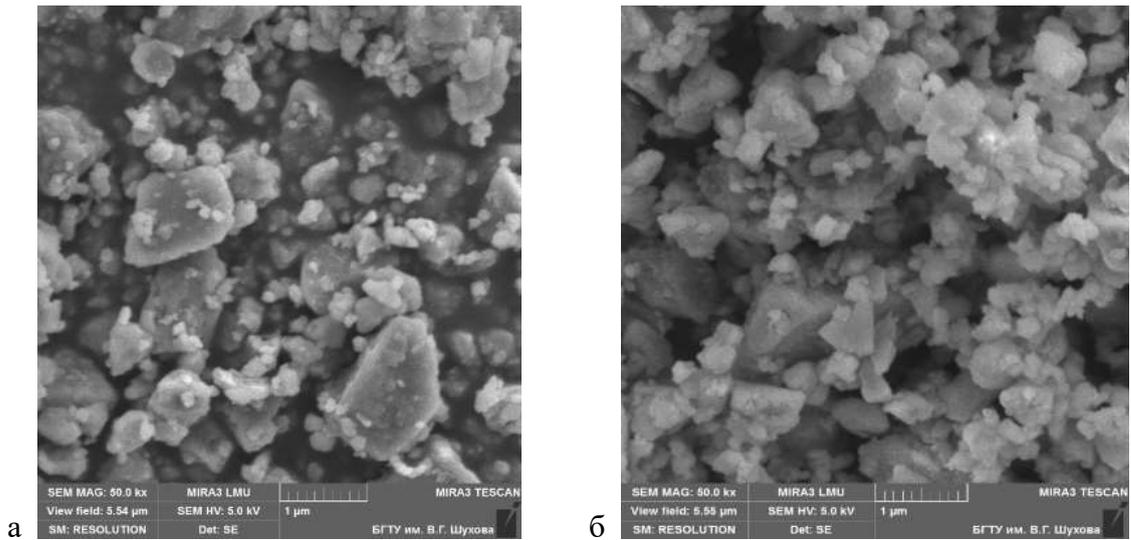


Рисунок 3.13 – Микрофотографии частиц тонкомолотого ВКВП, размолотого в:  
*а* – вибрационной мельнице; *б* – струйной мельнице

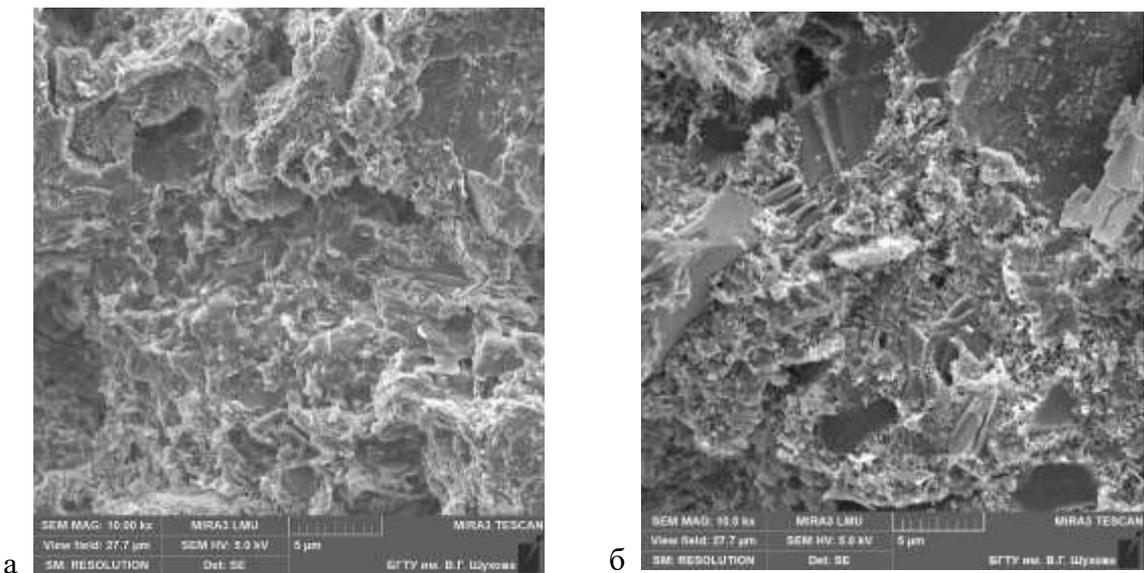


Рисунок 3.14 – Микроструктура образцов с ВКВП, полученным на:  
*а* - вибрационной мельнице, *б* - струйной вихревой мельнице

Таким образом, получены уравнения регрессии, показывающие характер влияния количества тонкомолотого отсева КВП и его удельной поверхности на прочность портландцемента. Установлено, что при удельной поверхности  $S_{уд}=300 \text{ м}^2/\text{кг}$  целесообразно вводить добавку в количестве 3–4 %. При повышении удельной поверхности КВП активность цементных систем возрастает при расходе добавки в размере 7 %. Для получения активной минеральной добавки целесообразно производить помол до  $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Установлено, что наиболее рациональным будет использование 9% выветренного КВП ( $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), полученного в вибромельнице, и 7% – в струйной. Образцы с наполнителем, полученным на вибрационной мельнице обладают более высокими показателями активности за счет меньшего содержания пылевидных фракций, повышающих водопотребность бетона, и более рациональным соотношением частиц разных фракций, служащих центрами кристаллизации новообразований, что в целом способствует уплотнению композита и увеличению его прочности.

### 3.5 Выводы

1. Таким образом, доказана возможность использования КВП, затронутых процессами выветривания в качестве сырья стройиндустрии, что позволяет рассматривать определенные геологические процессы как этап технологии производства строительных материалов, снижающий энергоемкость их производства.

2. Установлены закономерности влияния фазовой структуры ВКВП на процессы твердения вяжущего на его основе, заключающиеся в его более высокой пуццолановой активности при гидратации вяжущего по сравнению с традиционным НКВП и природным кварцевым песком за счет наличия кремнезема в виде аморфных образований, возникших при выветривании кварца, и повышения дефектности структуры в процессе выветривания.

Выявлен характер влияния удельной поверхности вводимых компонентов на характеристики активности КВ, заключающийся в увеличении активности КВ с использованием 20 % ВКВП при показателях удельной поверхности  $S_{уд}=500 \text{ м}^2/\text{кг}$  за счет большего содержания и высокой пуццолановой активности образовавшихся в процессах выветривания аморфных фаз кремнезема ВКВП, обеспечивающих интенсификацию и более полное вовлечение этих фаз в реакции связывания гидроксида кальция цементной системы с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция второй генерации.

3. Установлена зависимость характеристик активности цементных систем с добавкой тонкомолотого КВП от удельной поверхности  $S_{уд}$  (300–700  $\text{м}^2/\text{кг}$ ) и расхода добавки (3–7%). Показано, что прочность образцов возрастает при всех расходах добавки с увеличением удельной поверхности наполнителя. При этом характер нарастания неодинаков при использовании выветренного и свежего КВП. Однако максимальные значения в обоих случаях достигаются при расходе наполнителя в размере 7% с показателями  $S_{уд}=700 \text{ м}^2/\text{кг}$ . При  $S_{уд}=300 \text{ м}^2/\text{кг}$  минеральную добавку целесообразно вводить в количестве 3–4 % от массы цемента, при дальнейшем увеличении происходит снижение активности образцов.

4. Установлено, что при использовании в качестве активной минеральной добавки КВП, полученных на разных помольных агрегатах, с удельной поверхностью  $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$  значение активности образцов на ВКВП во всех случаях выше, чем на НКВП, так как при более тонком помоле реакционноспособные аморфные составляющие ВКВП интенсифицируют синтез большего количества гидратных фаз, особенно на контактной зоне «КВП – цементный камень».

5. Анализ влияния помольных агрегатов показал, что наиболее рациональным будет использование 9% минеральной добавки ВКВП ( $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), полученной в вибромельнице и 7% минеральной добавки ВКВП ( $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) – в струйной. Образцы с наполнителем, полученным на вибрационной мельнице обладают более высокими показателями активности за

счет меньшего содержания пылевидных фракций, повышающих водопотребность бетона, и более рациональным соотношением частиц разных фракций, служащих центрами кристаллизации новообразований, что в целом способствует уплотнению композита и увеличению его прочности.

#### 4. СОСТАВ И СВОЙСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

При выборе материала для строительства часто отдают предпочтение бетону. В частности, декоративный мелкозернистый бетон — это разновидность бетона, которая выходит за рамки ограниченной функции декоративного бетона. Он служит не только для чисто структурных или эстетических целей, но и сочетает в себе форму и функцию.

Благодаря идеальному сочетанию практичности и визуальной привлекательности, этот материал стал незаменимым в современном дизайне. Он органично вписывается в дизайн здания и производит сильное визуальное впечатление, привлекая внимание наблюдателя.

Декоративный мелкозернистый бетон часто выбирают за его способность повышать визуальную привлекательность конструкции. Благодаря своей пластичности он может принимать самые разные формы, текстуры и размеры, что позволяет архитекторам и дизайнерам создавать уникальные, привлекающие внимание элементы, которые могут выполнять как функциональные, так и декоративные задачи. Ввиду эстетической гибкости данный материал является предпочтительным для многих дизайнерских проектов, поскольку он может адаптироваться к различным стилям и направлениям - от современного минимализма до деревенского очарования.

Декоративный мелкозернистый бетон имеет широкий спектр применения ввиду своей эстетической привлекательности, долговечности и универсальности; он также придаёт зданиям индивидуальность и изысканность, выделяя их на фоне любого городского пейзажа. Этот современный индустриальный материал позволяет создавать различные сложные конструкции и узоры, поэтому фасады выглядят структурно целостно.

Следует отметить, что использование декоративного мелкозернистого бетона в качестве высокопрочного материала для проектирования подтверждает теоретические положения закона подобия в контексте новой трансдисциплинарной науки геоники [135-139].

#### 4.1 Мелкозернистые самоуплотняющиеся бетоны для малых архитектурных форм

На протяжении последних лет декоративный бетон получает все большее признание в качестве материала, используемого для повышения эстетической привлекательности зданий и сооружений. Он наиболее распространен при оформлении приусадебных участков и дворовых территорий (скульптуры, ограждения, архитектура малых форм и т.д.), изготовлении тротуарной плитки, внешней и внутренней отделке зданий и помещений, создании бордюров, ступеней, колонн, различных рельефов и т. д (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 - Декоративный мелкозернистый бетон для детской площадки

Применяя в качестве компонентов бетона цветные цементы, специальные заполнители, можно придавать бетону вид разнообразных каменных материалов природного происхождения. Поверхность бетона может быть подвергнута специальной обработке, с целью получения выразительной декоративной фактуры. Использование свойства пластичности бетонного раствора дает возможность находить бетону широчайшее применение при изготовлении различных декоративных элементов зданий и сооружений, формировать из него изделия, имеющие рельефную поверхность, а также придавать при необходимости эффект натурального камня практически в любом элементе интерьера (рисунок 4.2) [140-143].

Технические и эксплуатационные характеристики архитектурно-декоративного бетона зависят от состава компонентов и технологии производства. Выделяемыми характеристиками декоративного бетона являются: белизна материала - 68-85 %; схватывание - до 65 % от номинальной прочности не более 15 час; прочность сжатия: 3-суточная – 39 МПа, 28-дневная – 59 МПа; усадка при схватывании - не более 0,12 %; морозостойкость не менее F100; белый или окрашенный пигментами бетон прочнее и быстрее схватывается.

Выбор технологии изготовления зависит от будущих декоративных изделий. Способ формования, при котором бетон заливают в форму и оставляют до полного застывания, затем форму удаляют и, при необходимости, составы, используется для изготовления элементов фасада и ландшафта. детали дорабатывают вручную – шлифуют, красят и т.п.

Штампование, или технология печатного бетона используется для изготовления тротуарной плитки, площадок, напольных покрытий и пр. Рабочую поверхность заливают декоративным бетоном и после его схватывания с помощью штампов и матриц формируют рельефный рисунок. Штампы изготавливаются из алюминия, силикона, полиуретана, пластика. Металлические матрицы применяются для формирования на поверхности бетона текстуры кирпича или камня. Пластичные силиконовые и полиуретановые матрицы делают возможным создание рисунка с мелкой детализацией. Такие штампы легко снимаются, не повреждая поверхность. Жесткие пластиковые формы максимально точно передают все геометрические формы (рисунок 4.2).

На российском строительном рынке активно предлагают свои услуги многие фирмы по изготовлению декоративного бетона, выполняющие работы как вручную, так и в заводских условиях. Московский завод строительных материалов освоил вибролитьевую технологию получения декоративных бетонов на отечественном оборудовании.

Для этих целей применяется высокопрочный бетон с улучшенными технологическими свойствами на основе высокоактивных модифицированных

вяжущих. Вяжущее получено путем активации портландцемента с применением органических и минеральных добавок в шаровой мельнице.



Рисунок 4.2 - Изготовление элементов декоративного бетона:

*а* - матрицы для тиснения декоративного мелкозернистого бетона; *б* - создание скалы из декоративного бетона; *в*- заводское изготовление; *г* - архитектурные панели и силиконовые формы для них

Эффективность применения декоративных изделий на основе активированного цемента доказана опытом эксплуатации благоустроенных территорий в Москве.

Мелкозернистые самоуплотняющиеся бетоны широко применяются для изготовления малых архитектурных форм. Это связано с обилием мелких элементов и необходимостью придания изделиям необычной геометрической формы. Эти бетоны так же применяются для изготовления декоративных бетонных изделий (вертикального и горизонтального формования) сложной геометрии с высокими требованиями к качеству лицевой поверхности и изделий, эксплуатируемых на открытом воздухе.

Для изготовления малых архитектурных форм рекомендованы мелкозернистые бетоны с добавками, которые создают однородную структуру с характерной тонкой пористостью.

Основные элементы состава мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов для малых архитектурных форм:

- портландцемент с оптимизированным зерновым составом и нормированным содержанием частиц менее 9 мкм (достигается совместным помолом портландцемента с минеральными добавками);

- заполнители— кварцевый песок, мелкофракционный щебень, гранитная или мраморная крошка. Для обеспечения высокой текучести смесей форма зёрен заполнителя должна приближаться к окатанной, размер зёрен ограничиваться 16 мм, а доля мелкого заполнителя составлять не менее 0,45;

- пластифицирующие добавки, например, гиперпластификаторы, которые создают в бетоне однородную структуру. Применение добавок обязательно в цветных бетонах с некоторыми пигментами, разрыхляющими структуру мелкозернистого бетона.

К основным свойствам мелкозернистого самоуплотняющегося бетона для малых архитектурных форм можно отнести:

- высокую удобоукладываемость — смесь способна укладываться в опалубку без вибрации под воздействием собственной массы;

- заполняющую способность — бетон полностью заполняет все пустоты в опалубке под действием собственного веса;

- способность к преодолению препятствий — смесь преодолевает узкие сечения опалубки и формовочной оснастки, промежутки между стержнями арматуры без расслоения или блокирования крупного заполнителя;

- сопротивление сегрегации— смесь остаётся однородной по составу без расслоения при транспортировке и формовании.

Основными отличительными особенностями декоративного мелкозернистого бетона должны являться: способность принимать любую форму; внешняя привлекательность и максимальная приближенность по

фактурному и цветовому сходству к естественным материалам; атмосферо-, огне- и кислотостойкости, пожаробезопасность; широкая область применения. Достижению описанных выше свойств способствует применение самоуплотняющихся фибро- и текстильбетонов, что предоставляет широкие возможности по воплощению самых смелых архитектурных идей. Из таких бетонов часто выполняют малые архитектурные формы МАФ, элементы фасадов, стен, лестниц и т.п. Возможна окраска поверхности светостойкими красками или, например, лаком по бетону, что придает дополнительную привлекательность объекту и стойкость к атмосферным воздействиям.

Для проектов с использованием декоративного мелкозернистого бетона гораздо более важное значение, чем для традиционного бетона, имеет обеспечение постоянства всех технологических факторов. Например, таких, как контроль качества сырьевых материалов и бетонных смесей, обеспечение одинаковых условий твердения бетона, методов ухода за ним; одинаковая технология укладки и уплотнения бетонной смеси, качественная поверхность опалубки; обеспечение единообразия при обработке поверхности декоративного мелкозернистого бетона.

По сравнению с другими видами самоуплотняющийся бетон должен иметь значительно более высокое содержание мелкодисперсных составляющих, что является крайне важным для обеспечения однородности и нерасслаиваемости бетона при заполнении формы со сложной геометрией. Чтобы минимизировать количество вовлеченного воздуха, а также обеспечить хорошую растекаемость смеси и сцепление между компонентами, снизить риск образования дефектов, подвижность бетонной смеси должна быть достаточно высокой, но при этом вязкость смеси должна предотвращать расслоение смеси и оседание заполнителя.

Применение тонкодисперсных добавок (0–2 мкм) с более развитой удельной поверхностью в комплексе с использованием высокоэффективных пластифицирующе-водоредуцирующих добавок позволяет повысить плотность упаковки зерен в бетонной матрице, ее водоудерживающие свойства,

способность к самоуплотнению, а также обеспечить необходимые реологические характеристики при снижении водосодержания смеси. Для одновременного достижения достаточной подвижности и способности к сцеплению компонентов следует соблюдать оптимальное соотношение между ними.

Реализуемый в рамках комплексного развития территории в границах центральных улиц Белгорода проект "Белый квартал" предъявляет основное требование к фасадам зданий, их декоративным элементам, в том числе к малым архитектурным формам: должны быть исполнены в светлых тонах. Поэтому в работе для СУБ использовался белый портландцемент ПЦБ 1-500-Д0 ГОСТ 965-89, а также тонкодисперсный мел МТД-1 (99% менее 16 мкм) и тонкомолотый выветренный КВП ( $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ ).

Была разработана принципиальная схема по влиянию каждого компонента на свойства бетонной смеси (рисунок 4.8).

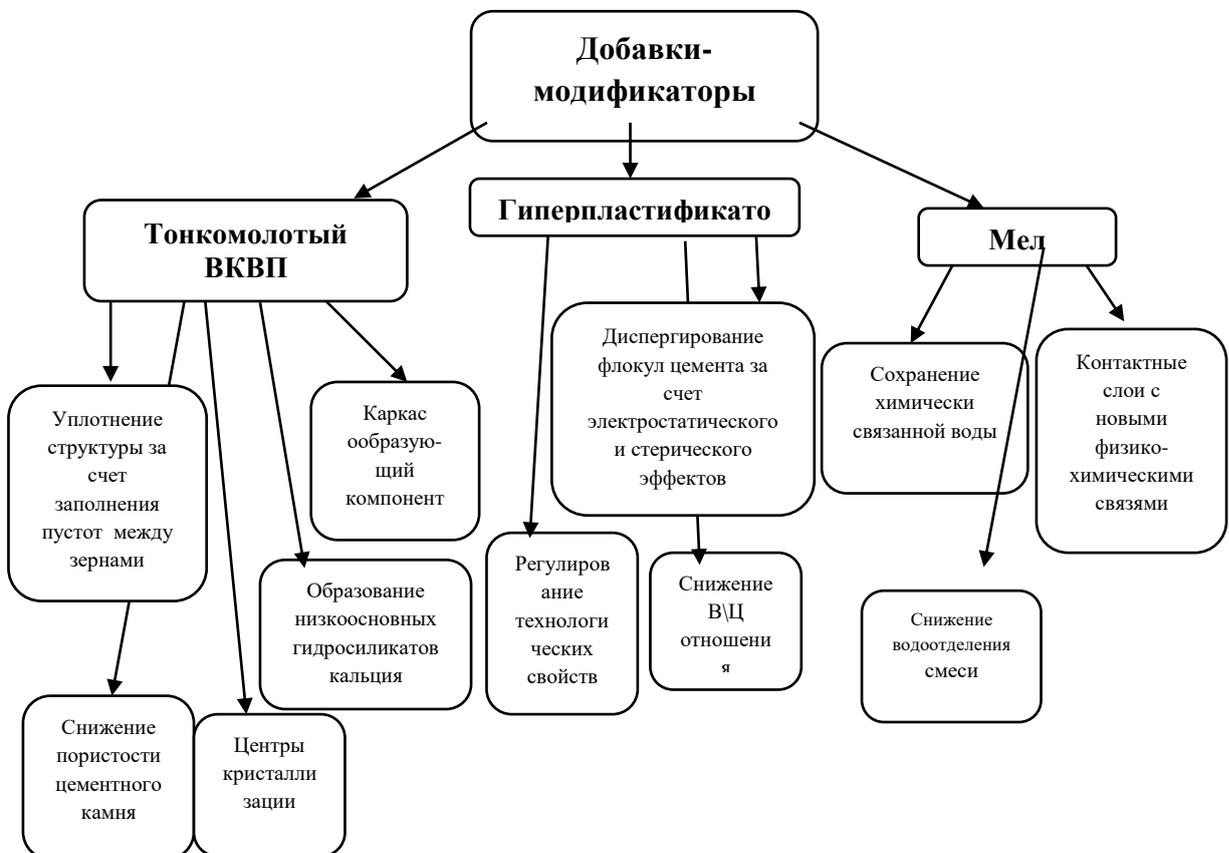


Рисунок 4.8. – Схема влияния модифицирующих добавок на свойства бетонной смеси

Мел, вводимый в бетонную смесь. будет объединять в себе функции, активной минеральной добавки и тонкодисперсного микронаполнителя, обеспечивать лучшую удобоукладываемость и нерасслаиваемость смеси.

Влияние кристаллохимических особенностей тонкомолотых выветренных кварцитопесчаников, кремнезем в которых подвергался переотложению в виде аморфных образований в процессе генезиса, а также аморфизации в результате помола, будет заключаться в активном связывании портландита, уплотнении структуры, уменьшении пористости и повышении прочности бетона.

Распространенные при производстве бетонных изделий нафталинформальдегидные суперпластификаторы обеспечивают водоредуцирование смеси в основном за счет адсорбции на зернах цемента и гидратных фазах новообразований, что затрудняет доступ воды к ним. Это приводит не только к значительному замедлению гидратации цемента, но и к расслоению смесей при повышенных количествах вводимой добавки-пластификатора, что делает невозможным получение самоуплотняющихся бетонных смесей на их основе.

Для получения бетонов используют гиперпластификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов. Эти добавки прикрепляются к поверхности цементного зерна в основном точечно и характеризуются пространственным строением молекулы с разветвленными боковыми цепями, что способствует более эффективной диспергации цементных агрегатов (флокул) за счет стерического эффекта, а также позволяет обеспечить доступ воды к клинкерным минералам.

В работе в качестве водоредуцирующего компонента использовали гиперпластификатор Реопласт ПКЭ-1230 на основе эфиров поликарбоксилатов. Оптимальное количество добавки для белого и серого цементов устанавливалось путем определения расплыва мини-конуса (таблица 4.3, рисунок 4.9).

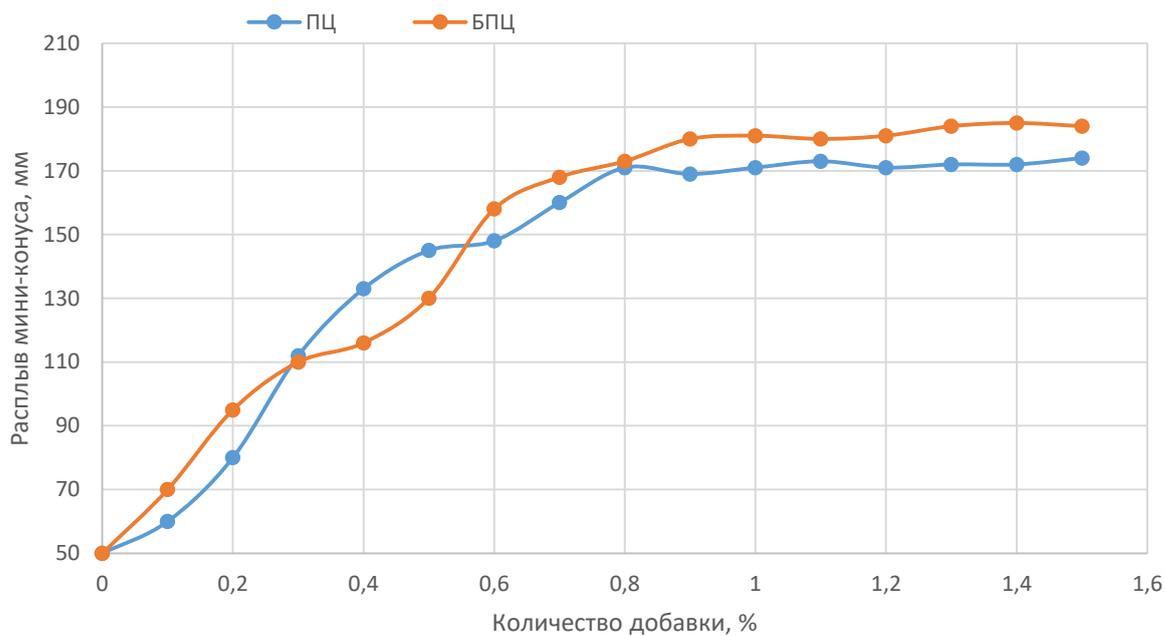


Рисунок 4.9 – Влияние Реопласт ПКЭ-1230 на реологию вяжущих

Таблица 4.3

### Влияние гиперпластификатора на свойства раствора

Расход компонентов, г		Концентрация, % по массе	Диаметр расплыва мини конуса, мм	
			ПЦБ	ПЦ
Вяжущее	Вода			
100	35	0	45	50
100	35	0,1	81	70
100	35	0,2	102	95
100	35	0,3	132	120
100	35	0,4	153	146
100	35	0,5	168	155
100	35	0,6	171	168
100	35	0,7	173	170
100	35	0,8	180	171
100	35	0,9	181	169
100	35	1	180	171
100	35	1,1	181	173

Установлено, что оптимальное количество добавки для ПЦБ составило 0,4 %, для ПЦ – 0,5%.

Большинство исследователей отмечает чувствительность поликарбоксилатных пластификаторов к минералогическому составу цемента, причем с повышением содержания сульфатов и алюминатов сохраняемость подвижности цементных систем с суперпластификаторами на основе эфиров поликарбоксилатов значительно уменьшается. При этом первоначальная адсорбция суперпластификаторов на основе эфиров поликарбоксилатов (СЭП) происходит преимущественно на гидросульфоалюминатах, но дальнейшее фазообразование приводит к быстрой потере подвижности цементного теста за счет перекрывания зоны стерических эффектов. Поэтому предпочтительным считается введение СЭП с последней третью воды затворения, что позволяет несколько продлить живучесть смеси за счет наличия неосажденных молекул СЭП в жидкой фазе.

Для того чтобы определить влияние вводимых добавок на свойства конечного СУБ, были проведены поисковые эксперименты, определяющие связь между исследуемыми параметрами и диапазоном их варьирования и функцией отклика.

В качестве исследуемых параметров поисковых экспериментов были выбраны:

- количество тонкомолотого ВКВП, %, –  $x_1$ ;
- количество добавки тонкомолотого мела, ТМ, % –  $x_2$ ;
- количество гиперпластифицирующей добавки, вводимой с последней третью воды затворения, ГП –  $x_3$ .

В качестве функций отклика были выбраны:

- прочность при сжатии 28 сут –  $R_{28сж}$ , Мпа;
- расплыв конуса – РК, см.

Матрица планирования, на основании которой проводились экспериментальные исследования, представлена в таблицах. В соответствии с принятым планом проведения эксперимента установлены три уровня

варьирования факторов: -1-минимальный; 0 - средний; +1 - максимальный; (таблица 4.4).

Таблица 4.4

### Условия планирования эксперимента

№	Кодированный вид	Натуральный вид	Диапазон варьирования			Шаг варьирования
			-1	0	1	
1	x1	Расход тонкомолотого ВКВП, %	7	9	11	2
2	x2	Расход добавки тонкомолотого мела, %	5	10	15	5
3	x3	Расход гиперпластификатора, %	0,8	1,1	1,6	0,4

Были заформованы образцы-кубы размером 7x7x7 см состава Ц:П 1:1, Ц/В=0,3. Растекаемость оценивали по ГОСТ 59715-2022 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний - определяли значения расплыва по конусу Абрамса.

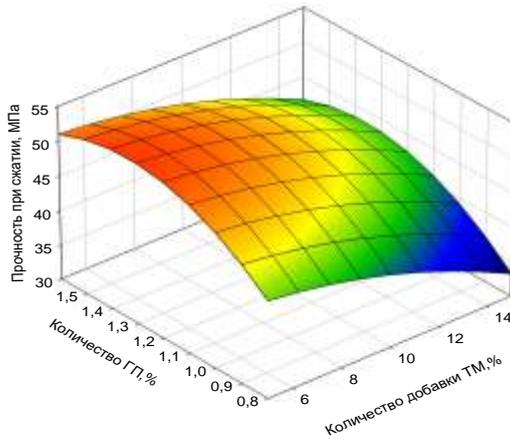
Также можно отметить сглаживание поверхности при введении ВКВП 7% при увеличении расхода мела. Прочности падают не так значительно по сравнению с системами с большим расходом кварцитопесчаника. Максимально резко прочности снижаются у систем при повышенном расходе ВКВП. Это связано с максимальным разбавлением мелкодисперсными наполнителями цементной составляющей, что приводит к нивелированию положительных качеств от введения добавок. В целом, можно сделать вывод, что максимальные прочности достигаются при расходе добавки ТМ 5–7,5 %, ВКВП 9 %, ГП 1-1,1 %. При этом создаются условия для формирования плотной и прочной структуры бетона

Полученные данные определения зависимости расплыва конуса от варьируемых факторов, позволили получить уравнение регрессии следующего вида:

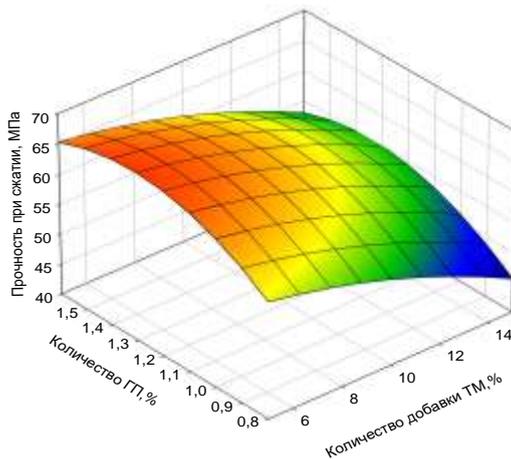
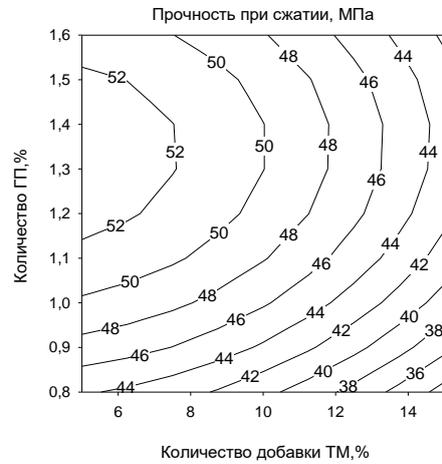
$$PK=59,1-0,8X1-0,3X2+7X3+5,8X1^2-1,6X2^2-3,11X3^2-0,25X1X2+X1X3-1,75X2X3$$

Анализ математической модели показал, что при увеличении количества наполнителей, а также при взаимодействии всех трех компонентов системы

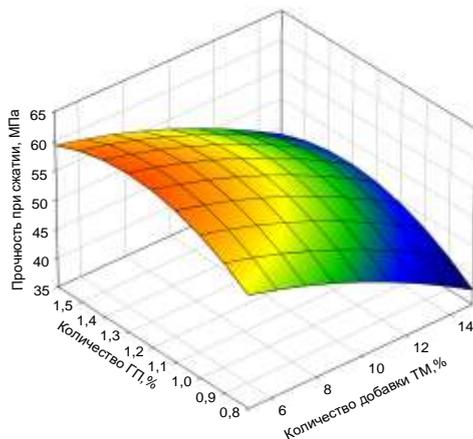
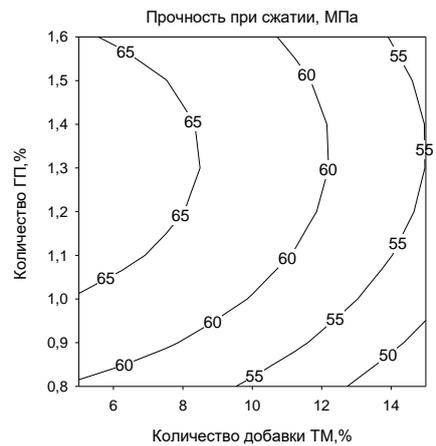
распływ конуса будет снижаться (знак «минус» при коэффициентах) (рисунки 4.10, 4.11), что заметно и визуально, при больших количествах ГП и наполнителей смесь расслаивалась со временем.



Содержание ВКВП 7%



Содержание ВКВП 9%



Содержание ВКВП 11%

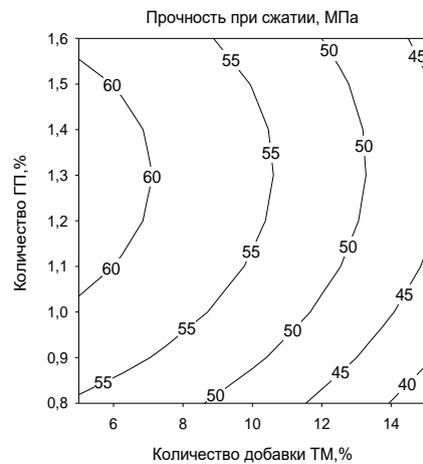


Рисунок 4.10 – Номограммы зависимости прочности бетона на ПЦБ от количества минеральных добавок

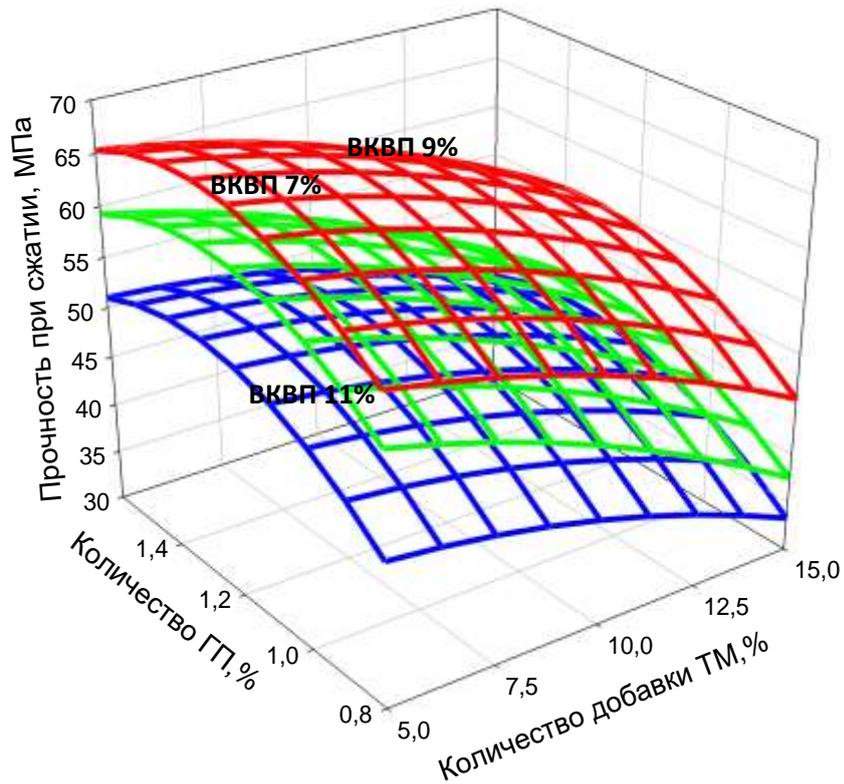


Рисунок 4.11 – Общая номограмма зависимости прочности бетона на ПЦБ от количества наполнителей

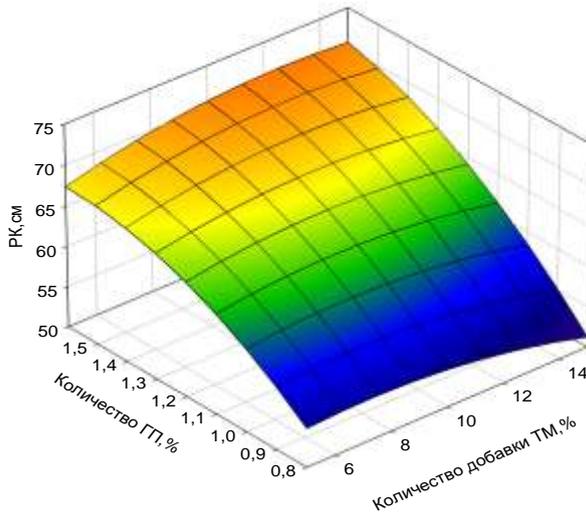
Наиболее значимым фактором является расход гиперпластификатора (максимальное значение коэффициента при  $x_3$  по абсолютной величине). Знак плюс при произведении коэффициентов  $x_1$  и  $x_3$  и минус при  $x_2$  и  $x_3$  говорит о том, что растекаемость смеси будет увеличиваться с возрастанием ВКВП и ГП и снижаться при увеличении ТМ и ГП. Это связано с большей адсорбционной емкостью кремнеземистых частиц тонкомолотого ВКВП по сравнению с добавкой мела. Молекулы пластифицирующей добавки, осаждаясь на частицах ВКВП, приводят к дефлокуляции агрегатов гидратирующихся цементных частиц, что приводит к повышению пластичности смеси. Тогда как развитая поверхность частиц, гидрофильность и большая пористость мела приводит к повышению водопотребности цементных систем даже в присутствии ГП.

Анализ математической модели показал, что при увеличении количества активных добавок, а также при взаимодействии всех трех компонентов системы распływ конуса будет снижаться (знак «минус» при коэффициентах) (рисунок 4.12), что заметно и визуально, при больших

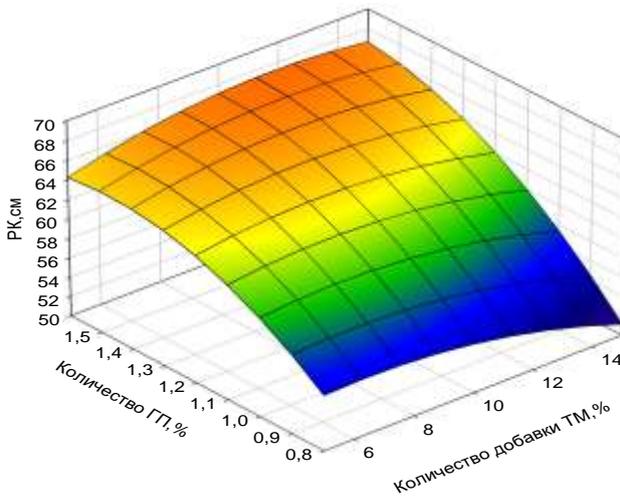
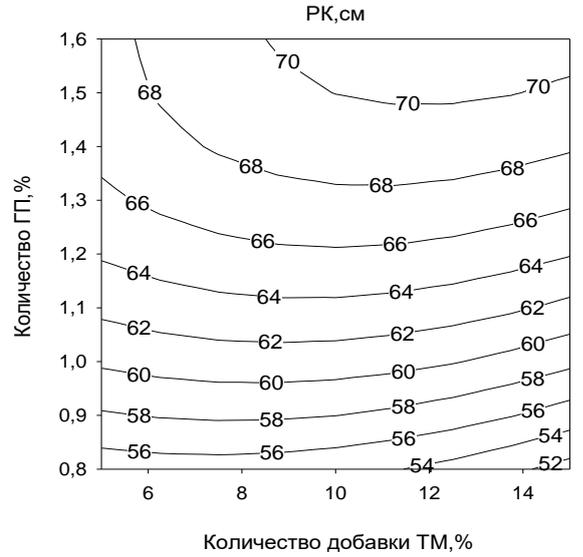
количества ГП и наполнителей смесь расслаивалась со временем. Наиболее значимым фактором является расход гиперпластификатора (максимальное значение коэффициента при  $x_3$  по абсолютной величине). Знак плюс при произведении коэффициентов  $x_1$  и  $x_3$  и минус при  $x_2$  и  $x_3$  говорит о том, что растекаемость смеси будет увеличиваться с возрастанием ВКВП и ГП и снижаться при увеличении ТМ и ГП.. Это связано с большей адсорбционной емкостью кремнеземистых частиц тонкомолотого ВКВП по сравнению с добавкой мела. Молекулы пластифицирующей добавки, осаждаясь на частицах ВКВП, приводят к дефлокуляции агрегатов гидратирующихся цементных частиц, что приводит к повышению пластичности смеси. Тогда как развитая поверхность частиц, гидрофильность и большая пористость мела приводит к повышению водопотребности цементных систем даже в присутствии ГП.

Увеличение количества, минеральных добавок до максимальных значений приводит к снижению и прочности бетона при сжатии, и растекаемости. Что можно объяснить фактом снижения емкости по адсорбции гиперпластификатора при перерасходе наполнителей, поэтому, несмотря на повышение процента его введения в систему, значительное возрастание доли мельчайших частиц все равно приводит к возрастанию водопотребности, дефициту жидкой фазы, расслоению смеси и, следовательно, формированию дефектной структуры бетона, приводящей к снижению прочности (рисунок 4.13).

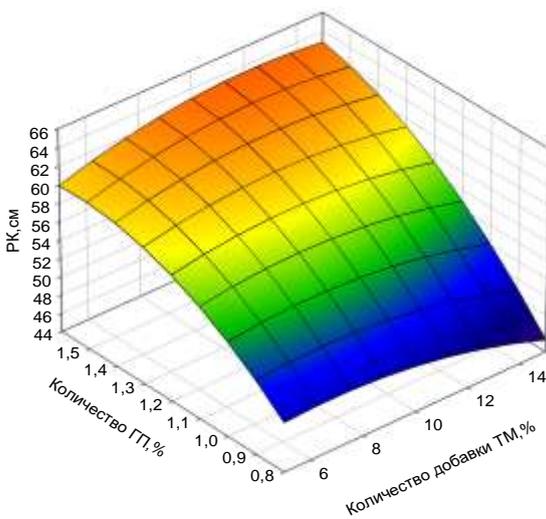
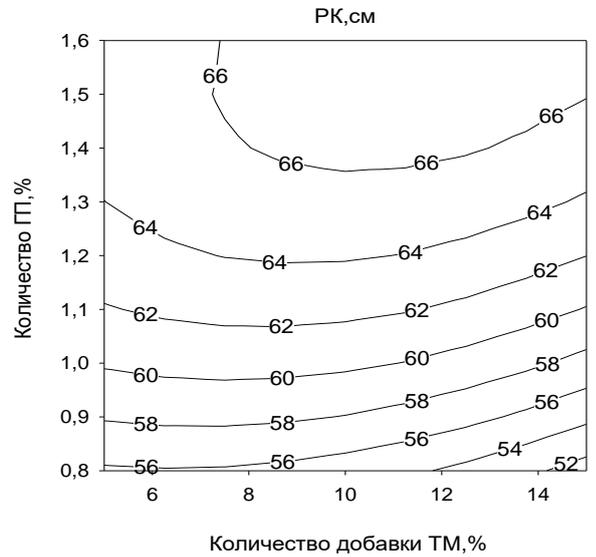
По сравнению с цементным камнем из цемента контрольного состава в продуктах гидратации композиционного цемента с содержанием добавок ТМ 5–7,5 %, ВКВП 9 %, ГП 1–1,1 %, содержится меньше гидроксида кальция в свободном состоянии, чем у цемента контрольного состава. Это указывает на более полное связывание гидроксида кальция возникающими новообразованиями и более высокое содержание в них гидратной воды. Такое изменение рассматриваемых показателей может способствовать повышению плотности цементного камня и его коррозионной стойкости.



Содержание ВКВП 7%



Содержание ВКВП 9%



Содержание ВКВП 11%

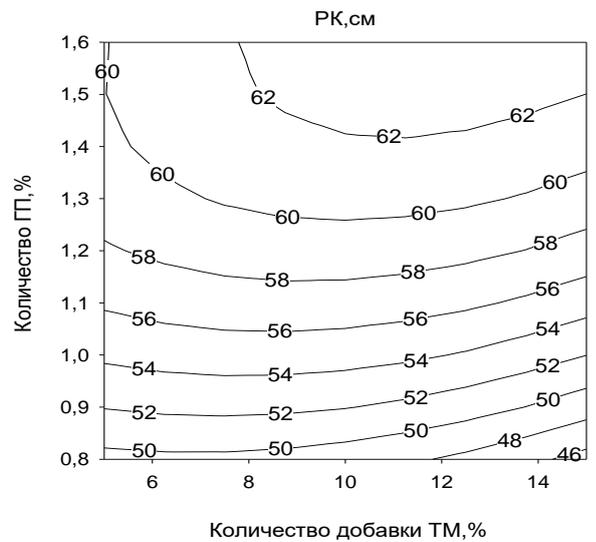


Рисунок 4.12 – Номограмма зависимости расплыва конуса смеси на БПЦ от количества минеральных добавок

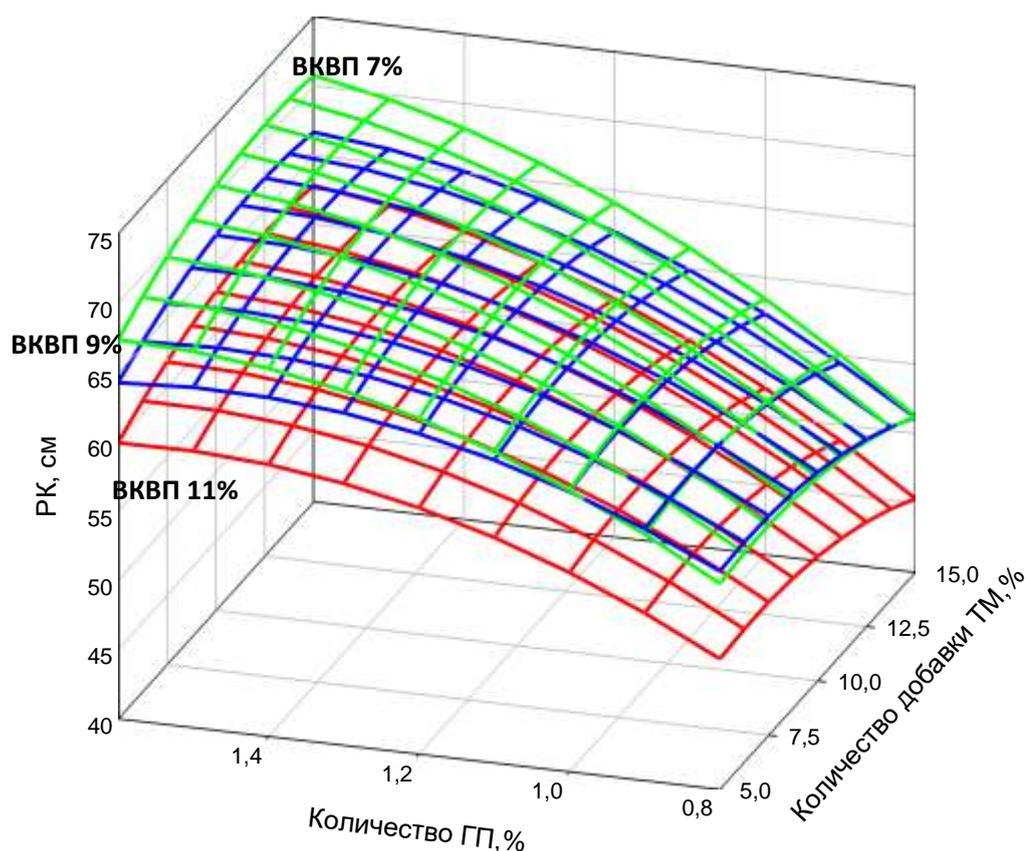


Рисунок 4.13 – Общая номограмма зависимости расплыва конуса смеси на ПЦБ от количества минеральных добавок

В работе отмечалось, что в присутствии карбонатных добавок может образовываться гидрокарбоалюминат кальция состава  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Появление дополнительных кристаллических фаз, в виде кристаллогидратов, способствует формированию более прочной и плотной структуры цементного камня.

Возможно также взаимодействие карбоната кальция с гидросиликатом кальция с формированием гидрокарбосиликатов различного состава.

Степень гидратации вяжущего оценивалась по изменению интенсивности линий основных минералов  $1,76\text{Å}$  (C3S);  $2,74$  и  $2,76\text{Å}$  (C3S, C2S) и линий продуктов гидратации, в частности портландита ( $4,92$ ;  $2,63\text{Å}$ ) (рисунок 4.14).

На основании полученных результатов были рассчитаны составы самоуплотняющегося бетона на белом цементе ПЦБ 1-500-ДО с заменой части заполнителя (состав 2) и части портландцемента (состав 3) на тонкомолотые добавки (таблица 4.5).

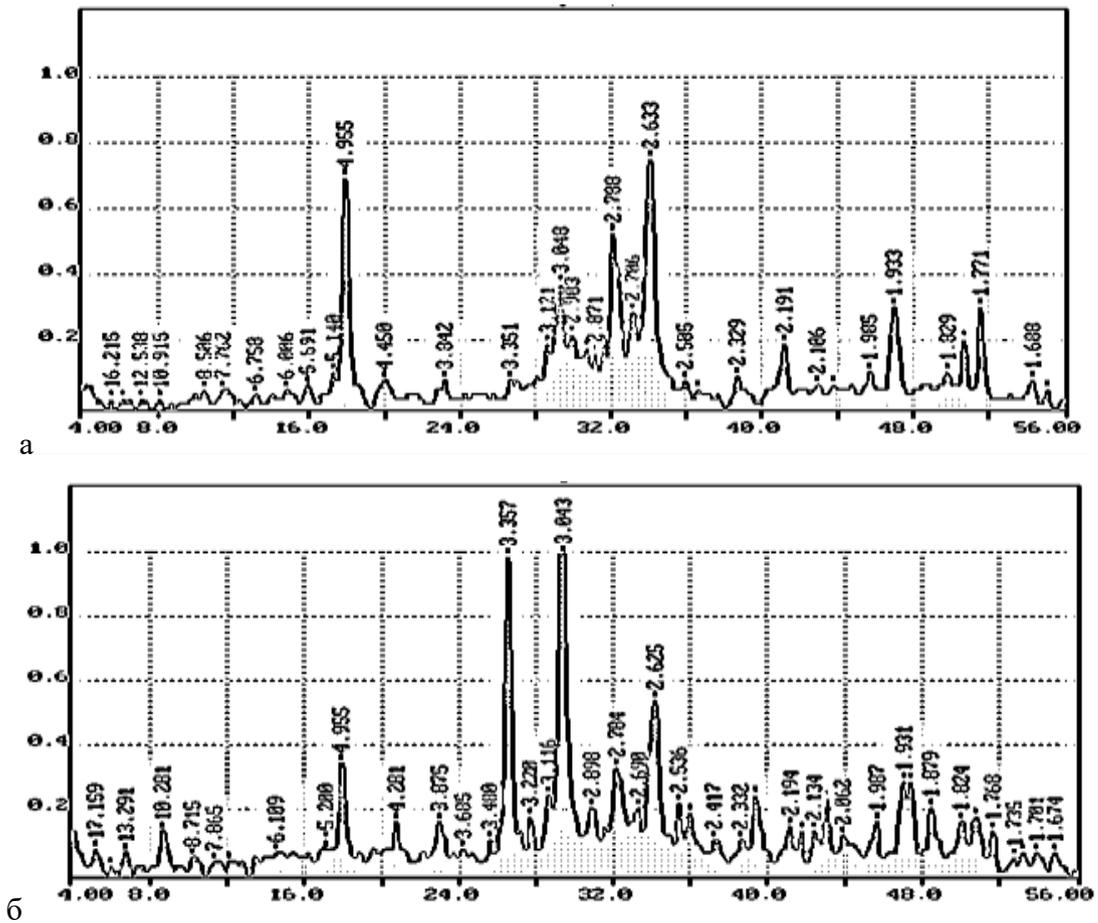


Рисунок 4.14 – Рентгенограммы: *а* - бездобавочного цементного камня;

*б* - с использованием добавок ТМ 5–7,5 %, ВКВП 9 %, ГП 1-1,1 %

Таблица 4.5

### Составы самоуплотняющихся смесей

Компонент	Составы		
	Контрольный Состав 1	Состав 2	Состав 3
Цемент белый ПЦБ 1-500-ДО ГОСТ 965-89, кг/м <sup>3</sup>	550	550	457
ВКВП, кг/м <sup>3</sup>	–	49,5	49,5
МТД кг/м <sup>3</sup>	–	38,5	38,5
Гиперпластификатор, кг/м <sup>3</sup>	6,05	6,05	6,05
Песок, кг/м <sup>3</sup>	1265	1171,5	1265
Вода, кг/м <sup>3</sup>	192,5	192,5	192,5

Результаты физико-механических испытаний мелкозернистого бетона разработанных составов представлены в таблице 4.6.

**Результаты физико-механических испытаний самоуплотняющегося бетона  
на разработанных вяжущих**

№ серий образцов	РК, см	Т500	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности 28 сут, МПа		Морозостойкость
				при сжатии	на растяжение при изгибе	
Состав 1	69	4,1	1905	38,8	6,1	F 150
Состав 2	65	3,6	1995	42,9	6,7	F150
Состав 3	64	3,8	1980	39,4	6,5	F150

Таким образом, установлено, что при расходе добавок ТМ 5–7,5 %, ВКВП 9 %, ГП 1-1,1 %, обеспечиваются максимальные прочностные показатели и достигается расплыв конуса 61–63 см. При этом создаются условия для формирования плотной и прочной структуры бетона, в результате снижения капиллярной пористости, путем распределения частиц наполнителей, имеющих различную структуру и геометрические размеры, между собой и частицами цемента, а также за счет реакций взаимодействия наполнителей с минералами цемента с образованием низкоосновных ГСК (пуццолановая реакция кремнезема с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) и гидрокарбоалюмината кальция (взаимодействие мела и СЗА) и, как следствие, получения прочного конгломерата. Возрастание прочности бетонов при введении в их состав микронаполнителей, также связано с тем, что наиболее мелкие зерна последних образуют центры кристаллизации в цементной системе.

#### 4.2 Мелкозернистые самоуплотняющиеся фибробетоны для получения ограждающих конструкций

С целью расширения областей применения ВКВП и получения изделий различного назначения на основе КВ с использованием данной минеральной добавки, в работе разработаны самоуплотняющиеся мелкозернистые фибробетоны для ограждающих малых архитектурных форм с добавлением

стеклянной фибры. Эти конструкции разграничивают и формируют пространство, выполняют ограждающую функцию, сохраняя при этом декоративные свойства.

При проектировании фибробетона основными факторами, влияющими на его свойства, являются: количество фибры, водоцементное отношение, содержание заполнителей (песка), ориентация и длина фибры, условия твердения. Далее осуществляли подбор такого количества фибры, чтобы она наиболее равномерно распределялась по всему объему изделия, избегая ее перерасхода, во избежание негативного влияния на реологию получаемых смесей. Количество фибры, ее длина и ориентация в первую очередь влияют на предел прочности при растяжении ( $R_p$ ), предел прочности при изгибе ( $R_{изг}$ ) и ударную вязкость. Нормативным документом, содержащим рекомендации по проектированию конструкций из стеклофибробетона, является ВСН 56–97 «Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций».

Из литературных источников известно, что длина фибры для архитектурного фибробетона соответствует диапазону 1,5–3 см. Для определения оптимального количества вводимой фибры были заформованы образцы-балочки 4×4×16 см с соотношением компонентов вяжущее:песок = 1:3, В/Ц 0,35 на цементе с количеством фибры 1,5; 3; 4,5 % по массе.

Результаты физико-механических испытаний образцов-балочек приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7

#### Физико-механические свойства бетонов в зависимости от расхода фибры

№ серий образцов	Волокна		Предел прочности при сжатии		Предел прочности на растяжение при изгибе	
	длина, мм	% по массе	велич., МПа	прирост, %	велич., МПа	прирост, %
Без волокон			33,0	-	5,6	-
1	30	1,5	37,1	12,4	6,2	10,7
2	30	3,0	37,8	14,6	7,1	26,8
3	30	4,5	34,8	5,5	6,8	21,4

Оптимальный процент армирования составил 3 % от массы цемента, при котором прирост прочности был максимальным и составил 14,6 % для прочности на сжатие и 26% – для прочности при растяжении.

На основании полученных результатов были рассчитаны составы стеклофибробетона с заменой части портландцемента на тонкомолотые добавки.

Таблица 4.8

### Составы смесей самоуплотняющихся фибробетонов

Компонент	Составы		
	Контрольный Состав 1	Состав 2	Состав 3
ЦЕМ I 42,5 Н	540	540	486
ВКВП, кг/м <sup>3</sup>	–	48,6	48,6
Гиперпластификатор, кг/м <sup>3</sup>	5,9	5,9	5,9
Песок, кг/м <sup>3</sup>	1620	1566	1620
Вода, кг/м <sup>3</sup>	189	189	189
Фибра, кг/м <sup>3</sup>	–	12	12

Результаты физико-механических испытаний мелкозернистого бетона разработанных составов представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7

### Результаты физико-механических испытаний мелкозернистого фибробетона на разработанных вяжущих

№ серий образцов	РК, см	Т500	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности, 28 сут МПа		Морозостойкость
				при сжатии	на растяжение при изгибе	
Состав 1	67	3,9	2210	36,1	5,8	F 150
Состав 2	62	4,5	2250	45,8	7,8	F200
Состав 3	60	4,7	2235	40,2	7,5	F150

Анализ полученных результатов показал увеличение прочности бетонов обоих составов по сравнению с контрольным, несмотря на сокращения количества цементной составляющей в составе 3. Прирост прочности бетона по сравнению с бетоном без фибры составил 23 и 11 % для прочности при сжатии и

34 и 29 % для прочности на растяжение при изгибе для составов 2 и 3 соответственно.

Реологическая характеристика бетонной смеси – условная вязкость T500 установлена одновременно с определением диаметра расплыва, как время растекания смеси до достижения диаметра 500 мм.

Таким образом, подтверждена эффективность применения минеральных добавок-модификаторов на основе выветренного КВП и мела, стеклянной фибры в количестве 3 % по массе, заключающаяся в увеличении прочности при сжатии до 23 % и прочности на растяжение при изгибе до 34 %, а также в снижении пористости и повышении плотности и морозостойкости бетона с учетом утилизации техногенного сырья. Разработанные составы могут с успехом применяться для изготовления малых архитектурных форм сложной конфигурации, в частности для ограждающих конструкций.

#### **4.3 Мелкозернистые бетоны на композиционном вяжущем для 3D-аддитивных технологий**

Актуальность разработки декоративных мелкозернистых бетонов на КВ для 3D-аддитивных технологий обусловлена несколькими факторами:

**Потребность в новых композиционных материалах.** Использование неадаптированных сырьевых смесей для 3D-печати приводит к появлению различных дефектов и повреждений: нарушению геометрических форм, разрывам слоёв, слабой адгезии, снижению прочностных свойств, морозостойкости, скорости печати и других.

**Необходимость в оптимизации составов.** Для повышения эффективности 3D-печати и качества печатных строительных объектов нужно оптимизировать составы, в том числе использовать КВ с заданными свойствами.

**Возможность изготовления малых архитектурных форм.** Технология строительной 3D-печати позволяет реализовывать сложные пространственные формы изделий с любым уровнем индивидуализации без повышения издержек.

**Экономическая эффективность.** Использование КВ позволяет снизить материалоемкость, сократить затраты на производство бетонов, а также снизить энергетические затраты на строительное производство.

Таким образом, актуальность разработки декоративных мелкозернистых бетонов на композиционном вяжущем для 3D-аддитивных технологий связана с потребностями строительной отрасли, требованиями к качеству и эффективности строительных процессов, а также с возможностью создания новых видов продукции с уникальными свойствами [144-149].

#### **4.3.1 Свойства мелкозернистых бетонов для 3D-аддитивных технологий в зависимости от состава**

Такие изделия, как элементы заборов, различные вазоны, скамейки и другие МАФ, традиционно получают в заводских условиях с использованием смесей, уплотняемых вибрацией. Однако наименьшая конкуренция, в настоящий момент имеет место в нише МАФ из декоративного мелкозернистого бетона. Развитие данного направления поможет ощутимо расширить гамму предлагаемой продукции, отличающейся низкой стоимостью, высокой функциональностью и долговечностью, а также позволит использовать слоистость изделий, как элемент декора.

Благодаря 3D-технологиям возможна реализация сложных архитектурных форм, индивидуальных элементов декора и даже функциональных строительных конструкций. Технология позволяет воплотить в жизнь нестандартные проекты, предоставляя новые возможности для интерьерной архитектуры, ландшафтного дизайна и строительства.

Использование композиционных вяжущих в составе таких бетонов поможет сократить расход дорогостоящей клинкерной составляющей, а также повысить коррозионную стойкость изделий за счет более плотной структуры бетонов и меньшего содержания свободного гидроксида кальция [150-152].

Для определения эффективности использования композиционных цементов с наполнителем из ВКВП в мелкозернистых бетонах были проведены сравнительные исследования физико-механических свойств бетонов на полученном в работе КВ (КВ20 и КВ50) на основе ВКВП и портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н, твердевших в нормальных условиях. В качестве мелкого заполнителя использовался песок Безлюдовского месторождения с модулем крупности  $M_{кр} = 1,76$  и отсев дробления КВП  $0,315-1,25 M_{кр} = 1,8$ . Выбор заполнителей осуществлялся исходя из предположения, что такой модуль крупности позволит обеспечить минимальную водопотребность смеси при максимальной пластичности, необходимой в последующем для экструдирования с помощью 3D-принтера. Исключение из техногенного песка мелких фракций менее 0,315 мм способствует сокращению содержания примесей слюдястых минералов, препятствующих адгезии цементного камня к заполнителю

Изучение прочностных показателей мелкозернистого бетона проводилось на образцах размером 7x7x7 см в составах 1:3, твердеющих в воздушно-влажностных условиях (ГОСТ 310.4-81). Влияние состава композиционного вяжущего и вида мелкого заполнителя на прочность мелкозернистого бетона представлены на рисунке 4.15.

Результаты испытаний бетонов в возрасте 28 сут твердения на композиционном и обычном портландцементе с использованием природного и техногенного песка показывают, что КВ КВ20 сопоставимы по прочности или превышают ее у мелкозернистых бетонов на цементном вяжущем. С увеличением концентрации наполнителя из ВКВП в КВ до 50 % прочность мелкозернистых бетонов падает ниже значений контрольных образцов.

Как видно из графиков (рисунок 4.15), применение техногенного песка из отсева дробления КВП (0,315–1,25 мм) повышает прочность мелкозернистого бетона по сравнению с бетоном на природном кварцевом песке на 9-11% через 28 сут твердения. Это может быть объяснено более дефектной структурой поверхности частиц заполнителя и отсутствием мелкой песчаной и пылевидных фракций, что приводит к образованию прочной контактной зоны заполнителя с

вяжущим (рисунок 4.16, б). В зависимости от вида используемого КВ, возможно получение мелкозернистых бетонов прочностью 25–30 МПа на обычном песке и 27–35 МПа на техногенном из отсева дробления КВП.

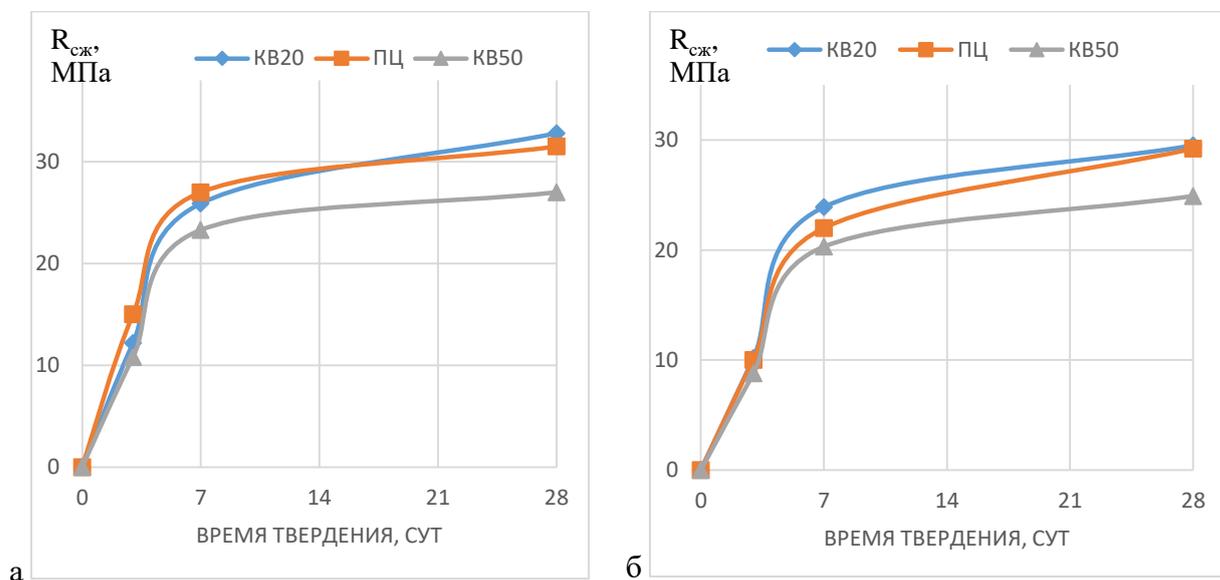


Рисунок 4.15 – Влияние состава композиционного вяжущего и вида мелкого заполнителя на прочность мелкозернистых бетонов (1:3):

*а*- на фракционированном отсева дробления КВП; *б*- на песке

Анализ микроструктуры образцов мелкозернистого бетона также показал, что поверхность контакта между техногенным мелким заполнителем окружена прочно сросшейся пленкой гидросиликатов кальция (рисунок 4.16, б), наблюдается омоноличивание композита с плотным зарастанием пор гидратными фазами и обжатие частиц наполнителя и мелкого заполнителя матрицей многокомпонентного состава, что придает композиту высокие прочностные показатели. В то же время между поверхностью кварцевого песка и цементной матрицей мелкозернистого бетона контрольного состава наблюдаются участки со слабым сцеплением, прослеживается зазор (рисунок 4.16, а).

Состав КВП оказывает влияние на микроструктуру цементного камня. Взаимодействие с цементной матрицей связано с особенностями структуры заполнителя, такими, как угловатая форма зёрен с высокоразвитой поверхностью и высокое содержание кремнезема в отсева дробления КВП. Данные характеристики структуры материала способствуют повышенной адгезии

цементного камня, что влияет на процессы структурообразования цементной матрицы.

Механизм действия заключается в интенсификации гидратации системы за счёт более развитой и дефектной структуры кремнеземсодержащего компонента, что приводит к синтезу более однородной структуры матрицы с минимальным количеством пор и микротрещин.

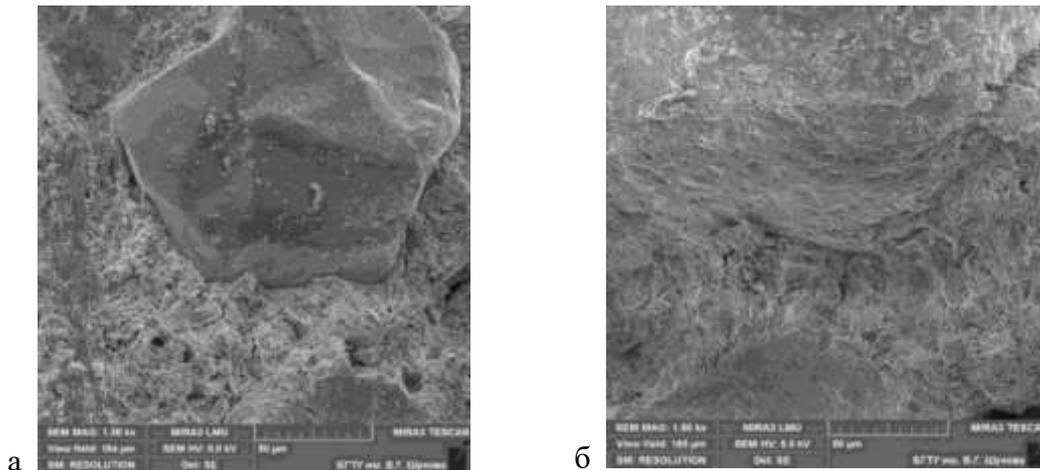


Рисунок 4.16 – Контактная зона: *а* - кварцевого песка и мелкого заполнителя на основе отсева КВП; *б* - с цементной матрицей бетона

Сравнивая прочностные показатели бетонов на традиционном и композиционном вяжущем, следует отметить преимущества последних, позволяющих получать бетоны повышенной прочности при меньшем расходе клинкерного вяжущего, при этом применение техногенного мелкого заполнителя позволяет получать композиты, превосходящие по прочности составы на природном кварцевом песке.

В соответствии с требованиями СНиП 82-02-95 (п. 5.17), бетонные смеси для 3D-бетонов с маркой по подвижности П2 необходимо использовать совместно с пластифицирующими добавками. В этой связи исследовали эффективность разжижения цементного теста на композиционном вяжущем добавками гиперпластификатора Линамикс ПК и суперпластификаторов СП-1, оптимальную дозировку добавок подбирали по расплыву цементного теста с помощью малого усеченного конуса (рисунок 4.17).

Приведенные данные свидетельствуют о том, что использование гиперпластификатора Линамикс ПК на основе модифицированных поликарбоксилатов обеспечивает наиболее эффективное разжижение цементного теста при оптимальной дозировке 0,30–0,45 %. При переходе к мелкозернистым бетонным смесям дополнительно оценивали эффективность разжижающего действия гиперпластификатора в смесях с мелким заполнителем 1:1,5 и 1:3 при постоянном В/Ц (таблица 4.8).

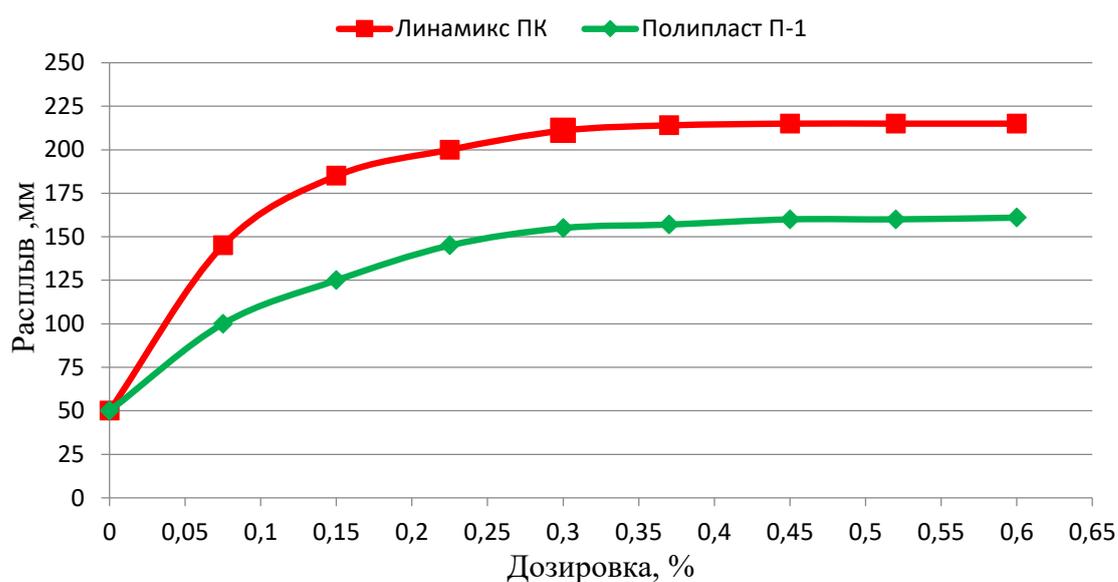


Рисунок 4.17 – Влияние добавок-разжижителей на текучесть цементного теста из композиционного вяжущего КВ 20

Результаты испытаний показали, что применение ГП Линамикс ПК (0,45 %) эффективно разжижает мелкозернистую бетонную смесь, увеличивая распыл конуса смеси приблизительно в 2 раза (22–46 см), мало влияя на прочность при постоянном расходе КВ и воды. С ростом содержания мелкого заполнителя 1:1,5–1:3 дозировка ГП Линамикс повышается от 0,45 до 0,8 % в смесях на отсеве дробления КВП (0,315–1,25 мм) и до 0,6 % на кварцевом песке.

В целях оптимизации оптимизации реологических показателей мелкозернистых смесей в соответствии с требованиями строительной печати, на основании ранее выполненных разработок и предварительных исследований была применена комбинация пластифицирующей (Линамикс ПК) и воздухововлекающей (Полипласт Аэро) добавок. Были заформованы образцы-

кубы размером 7х7х7 см. Прочностные показатели оценивались в возрасте 2, 14, 28 сут твердения. В таблице 4.8 показано сравнительное влияние указанной комбинации добавок на пластичность составов мелкозернистых бетонов для строительной печати и их основные физико-механические показатели.

Таблица 4.8

**Физико-механические свойства мелкозернистых бетонов  
для 3-D аддитивных технологий**

Состав	Пластификатор, масс. % от вяжущего	Воздуховывлекающая добавка, масс. % от вяжущего	Вязк : П	Расход материалов кг/м <sup>3</sup>			В/Ц	Осадка конуса, мм	R <sub>сж</sub> , МПа в возрасте, сут			R <sub>ср</sub> , кг/м <sup>3</sup>	Морозостойкость
				КВ20В	Песок	Вода			2	14	28		
Кварцевый песок													
1	–	–	1:1,5	792	1188	324	0,41	25	24,7	35,2	42,8	2254	F не менее 100
1a	0,45	0,6							52	27,3	38,4		
2	–	–	1:3	500	1550	250	0,52	22	11,8	25,3	29,9	2250	
2a	0,6	0,6							46	12,2	29,8		
Отсев КВП (0,315–1,25 мм)													
3	–	–	1:1,5	777	1166	350	0,45	24	26,8	37,8	43,5	2223	F не менее 100
3a	0,45	0,6							48	27,4	40,0		
4	–	–	1:3	500	1500	275	0,55	24	11,4	29,7	34,8	2245	
4a	0,8	0,6							49	14,5	30,6		

Как видно из полученных данных разработанные составы формовочных смесей достаточно быстро набирают начальную прочность, что обеспечивает возможность через 48 часов удалять изделия из поля печати.

Использование КВ на основе минеральной добавки выветренного КВП (20%) и мелкого заполнителя из отсева дробления КВП позволяет получать прочные мелкозернистые бетоны В 25-30 в нормальных условиях твердения. Повышение прочностных свойств мелкозернистых бетонов обусловлено, во-первых, формирующейся уплотненной структурой цементной матрицы мелкозернистого бетона, заполнение пор в частицами тонкодисперсного наполнителя, которые при этом играют роль активных центров кристаллизации

(рисунок 4.18); во-вторых, повышенной адгезией формирующейся цементной матрицы к мелкому заполнителю из отсева КВП, на развитой поверхности зерен которого формируются тонкие пленки гидратных фаз, что приводит к усилению контактной зоной между заполнителем и цементным камнем.

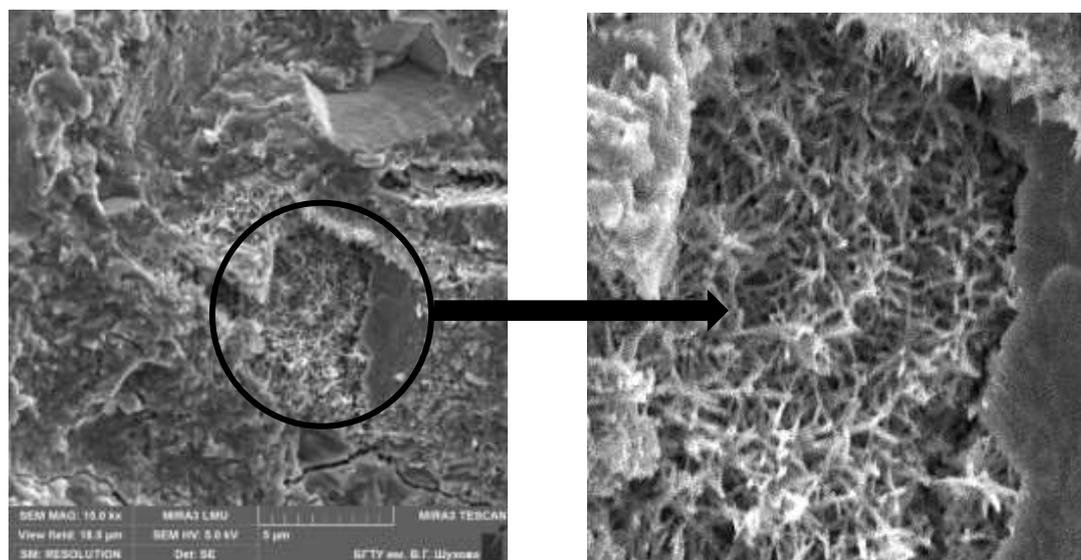


Рисунок 4.18 – Пора, заполненная продуктами гидратации, образованными на частице тонкодисперсного наполнителя

Таким образом, разработанные формовочные смеси подтверждают высокую эффективность использования композиционного вяжущего с 20% минеральной добавки ВКВП и мелкого заполнителя из отсева КВП для 3D-аддитивного производства МАФ. При этом улучшается экологический компонент производства, так как снижается потребление портландцемента и невозобновляемых природных ресурсов.

#### 4.3.2 Формуемость и послойная укладка как важный этап 3D-печати

Строительная 3D-технология включает стадии приготовления вязкопластичной смеси, транспортирование ее из смесителя в экструдер, экструдирование, послойную укладку, твердение напечатанных слоев. Экструдер выдавливает специальную формовочную смесь, каждый

последующий слой которой укладывается поверх предыдущего, благодаря чему образуется вертикальная конструкция.

Эффективность и технологичность строительной 3D-технологии определяется совокупностью критериальных характеристик формовочных смесей для реализации процесса экструзии (удобоукладываемостью, сроками схватывания и др.) и скоростью структурообразования и твердения композитов (плотностью, прочностью, пористостью и др.).

Формовочным смесям для послойного безопалубочного бетонирования присущи специальные свойства, такие, как экструдирруемость или печатаемость, несущая способность, а также время фиксации структуры свежотформованного слоя.

Особым требованием является формоустойчивость, т.е. сохранение приданной формы под действием собственного веса, а также способность выдерживать нагрузки от уложенных верхних слоев, а значит и вес всей конструкции. В зависимости от свойств применяемых формовочных смесей и конструкции принтера толщина одного наносимого слоя должна регулироваться индивидуально в каждом конкретном случае.

Важными показателями для формовочных смесей является обеспечение оптимального предела текучести и стабильные качества каждого напечатанного слоя, что позволяет выдерживать нагрузки отформованным слоям в процессе печати и эксплуатации здания, при этом максимальные нагрузки воспринимает самый нижний слой.

Для определения формоустойчивости и формуемости бетонной смеси для 3D-печати рассчитывали показатель несущей способности свежотформованного слоя (пластическая прочность) – П, а также реотехнологический индекс – РТИ (СТО 02066339-043-2020 «Смеси для получения композитов методом строительной печати на цементном вяжущем»).

Была вычислена несущая способность у свежотформованных слоев бетонных смесей разработанных составов на отсеке дробления КВП через 10, 20 и 30 мин. Установлено, что для состава с соотношением компонентов 1:1,5

пластическая прочность (формоустойчивость) нарастает быстрее, чем у смеси состава 1:3. Это особенно заметно в первые 10 мин. Далее прочности начинают приближаться по значению друг к другу (20 мин). Через 30 мин эти показатели возрастают у составов на композиционном вяжущем с добавкой (рисунок 4.19, таблица 4.9). В целом составы с пластификатором имеют более плавное нарастание показателя пластической прочности, что характерно для стабильного течения процессов набора прочности и их устойчивости.

Показатель несущей способности свежеотформованного слоя (пластической прочности)  $\Pi$  определяется по формуле:

$$\Pi = P/S, \text{ кПа}; \quad (4.7)$$

где  $P$  – давление, оказываемое на смесь, при которой смесь начинает выдавливаться из формы, кг;  $S$  – площадь штампа, которым производится сжатие, м<sup>2</sup>.

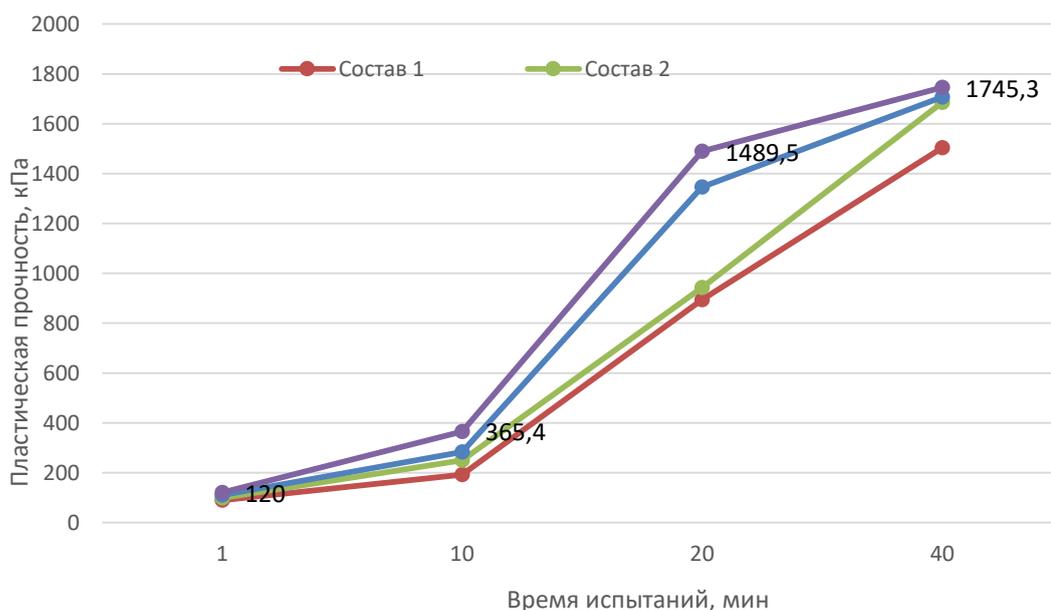


Рисунок 4.19 – Показатели несущей способности свежеотформованного слоя бетона

Исследования реологических свойств смесей показали её пригодность к процессу формирования способом 3D-печати. Установлено, что минимальная величина РТИ характерна для состава 6 (таблица 4.9).

Такие показатели смеси позволят осуществлять её эффективную укладку способом 3D-печати, давая возможность «отпечатанным» слоям без деформаций воспринимать нагрузку вышележащих слоев с необходимым интервалом

времени между цикличной печатью, а также обеспечить требуемое сцепление между слоями в течение заданного времени.

Таблица 4.9

**Соотношение реологических и прочностных характеристик  
мелкозернистого бетона**

№ п.п.	Водопоглощение, %	Пластическая прочность, КПа за время, мин			РТИ
		10	20	30	
1	4,5	290	1 346,5	1 403,5	29
2	4,1	350,3	1 392,63	1 585,7	32
3	3,9	182,5	894,3	1 206,9	27
4	3,7	276	1 113,5	1 345,3	30

На основе визуального осмотра уплотненных лабораторных составов установлено, что формируемые слои характеризуются плотным прилеганием, отсутствием трещинообразования, равномерностью отверждения по всей поверхности формируемого изделия. В целом это свидетельствует о рациональных составах разработанных бетонов для технологии 3D-печати.

Таким образом, реотехнологические свойства разработанных составов, содержащих комбинацию пластификатора и воздухововлекающей добавки, обеспечивают равномерную подачу смеси с помощью формирующего устройства строительного принтера. Укладка слоёв материала происходит равномерно, их оседание не превышает принятого на производстве значения 5%, количество дефектов печати минимально.



Рисунок 4.20 – Результат печати основания МАФ разработанным составом

Апробация полученных результатов проводилась на предприятии ООО «КЕЙКОД» (Белгород). На рисунке 4.20 приведен пример печати разработанным составом 4а основания малой архитектурной формы «Скамья с вазоном» на производственном участке предприятия ООО «КЕЙКОД».

#### 4.4 Выводы

1. Для организации выпуска современных МАФ из декоративного мелкозернистого бетона большой интерес представляют технологии, использующие самоуплотняющиеся бетоны и 3D-строительную печать, что позволяет реализовать сложные разнообразные пространственные формы изделий с любым уровнем индивидуализации без повышения издержек. Эффективность по комплексу свойств эстетичности, долговечности, энерго- и ресурсосбережению может быть обеспечена за счёт применения наиболее прогрессивных теорий строительного материаловедения, а именно: использования КВ адаптированных под конкретную задачу, использования нетрадиционных видов сырья, положений новой трансдисциплинарной науки геоники.

2. Установлено рациональное соотношение тонкомолотых микронаполнителей и гиперпластификатора (ВКВП - 8–10 %, мела - 5–7,5% и гиперпластификатора - 1-1,1 %) для составов СУБ, при котором обеспечиваются максимальные прочностные показатели и достигается расплыв конуса 61–63 см. При этом создаются условия для формирования плотной и прочной структуры бетона в результате снижения капиллярной пористости, путем распределения частиц наполнителей, имеющих различную структуру и геометрические размеры, между собой и частицами цемента, а также за счет реакций взаимодействия наполнителей с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и образования низкоосновных ГСК (пуццолановая реакция) и гидрокарбоалюмината кальция (взаимодействие мела и  $\text{C}_3\text{A}$ ) и, как следствие, получения прочного конгломерата. Возрастание прочности бетонов при введении в их состав микронаполнителей связано также

с тем, что наиболее мелкие зерна последних образуют центры кристаллизации в цементной системе.

3. Показано, что введение 3 % по массе стеклофибры в бетон позволило повысить его прочность при сжатии на 15 %, на растяжении при изгибе - на 27 % по сравнению с контрольным составом.

4. Предложены составы самоуплотняющихся бетонов с заменой части заполнителя или портландцемента на тонкомолотые добавки. Прирост прочности бетона по сравнению с бетоном без фибры составил 11 и 23 % для прочности при сжатии и 29 и 34 % для прочности на растяжение при изгибе соответственно. Разработанные составы могут с успехом применяться для изготовления малых архитектурных форм сложной конфигурации.

5. Установлено влияние состава композиционного вяжущего и вида мелкого заполнителя на прочность мелкозернистых бетонов (1:3) для аддитивного производства. Применение отсева дробления КВП (0,315–1,25 мм) повышает прочность мелкозернистого бетона по сравнению с заполнителем из традиционного кварцевого песка на 9-11 % через 28 сут твердения за счет более дефектной структуры поверхности частиц заполнителя и отсутствия мелкой песчаной и пылевидных фракций, что приводит к образованию прочной контактной зоны заполнителя с вяжущим. В зависимости от вида используемого композиционного вяжущего возможно получение мелкозернистых бетонов прочностью 25–30 МПа на обычном песке и 27–35 МПа на техногенном из отсева дробления КВП.

6. В целях оптимизации реологических показателей мелкозернистых смесей в соответствии с требованиями строительной печати на основании ранее выполненных разработок и предварительных исследований была применена комбинация пластифицирующей (Динамикс ПК) и воздухововлекающей (ПолипластАэро) добавок. Показано сравнительное влияние указанной комбинации добавок на пластичность составов мелкозернистых бетонов для строительной печати и их основные физико-механические показатели.

7. Определение формоустойчивости и формуемости бетонной смеси для 3D-печати осуществляли по методике, разработанной на кафедре СМИиК БГТУ им. В.Г. Шухова. Разработанные составы формовочных смесей достаточно быстро набирают начальную прочность, что позволяет отпечатанным слоям без деформаций воспринимать нагрузку вышележащих слоев с необходимым интервалом времени между циклической печатью, а также обеспечить требуемое сцепление между слоями в течение заданного времени.

## **5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **5.1 Разработка 3D-моделей из мелкозернистого бетона для малых архитектурных форм в соответствии с концепцией проекта «Белый квартал»**

Использование декоративного мелкозернистого бетона в малых архитектурных формах выходит за рамки чисто конструкционных или эстетических целей, сочетая форму и функциональность. Это слияние практичности и внешней привлекательности делает его незаменимым материалом в современном дизайне городской среды.

Декоративный мелкозернистый бетон, который может быть отлит в сложные конструкции и отделан множеством способов, предоставляет бесконечные возможности для создания захватывающих визуальных эффектов, которые единственны в своем роде. Такие изделия демонстрируют естественную красоту и простоту бетона и способны придать пространству стиль, который действительно необходим в современной городской архитектуре. Массивные формы, монументальные размеры или, наоборот, изящные, но выразительные элементы, характеризующиеся типичной формой, - все это делает возможность формирования характера пространства практически неограниченной.

Одна из основных функций малой архитектурной формы – органичность дизайна относительно окружающего пространства, что оптимально вписывает ее в городскую среду и создает визуально выразительный эффект, привлекающий внимание наблюдателя.

Декоративный мелкозернистый бетон — универсальный материал для коммерческого строительства, который подходит для возведения торговых центров, концертных залов, небоскрёбов и офисных зданий. На основе данного материала есть возможность создавать уникальные элементы фасадов, балконы, изогнутые строительные элементы, подпорные стенки, уличную мебель и многое другое.

Использование декоративного мелкозернистого бетона предусматривает возможность цветовых вариаций, запланированных проектом. Так, например, для воплощаемого в Белгороде проекта комплексного развития территории «Белый квартал» характерно исполнение основных строительных элементов и малых архитектурных форм в белых цветах.

Проведя сравнительный анализ визуальных и эстетических свойств возможных изделий на основе самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов, было принято решение максимально использовать преимущества данного материала, в частности пластичность и простоту придания формы на этапе производства. Для этого была разработана 3D-модель уличного светильника, сочетающего в себе изящность и минимализм, и в то же время стиль, который придает пространству современный вид. Данное изделие концептуально соотносится с элегантностью стилистики проекта «Белый квартал» (рисунок 5.1), реализуемого в границах центральных улиц Белгорода.



Рисунок 5.1 – Территория проекта «Белый квартал»

Следует отметить, что любая комбинация заполнителей может использоваться для получения контрастной поверхности, при условии соблюдения требуемой прочности бетона, долговечности и удобоукладываемости. Вид горной породы, цвет, форма (окатанность), размер заполнителя и глубина раскрытия зерен при абразивоструйной обработке могут варьироваться в зависимости от желаемого архитектурного эффекта.

Декоративный мелкозернистый бетон можно отделать множеством способов, чтобы придать ему различную текстуру и внешний вид. Выбор отделки бетонной поверхности существенно влияет на визуальную привлекательность конструкции и определяется дизайнерским смыслом проекта.

Разработанная в рамках данной научной работы 3D-модель уличного светильника из самоуплотняющегося мелкозернистого бетона на КВ с минеральными добавками ВКВП (9%), максимально органично интегрировалась в дизайн проекта «Белый квартал» (рисунок 5.2-5.3).



Рисунок 5.2. – 3D-модель уличного светильника из самоуплотняющегося бетона

Немаловажно учитывать взаимодействие людей со зданиями и окружающей средой, чтобы оптимизировать пространственное проектирование и компоненты зданий. Поэтому в современных строительных проектах используются уникальные трёхмерные архитектурные бетонные конструкции с учетом эргономических качеств. Эргономика играет ключевую роль в проектировании удобных, эффективных и комфортных для людей пространств, а эстетика

направлена на создание визуально привлекательных и значимых архитектурных форм.



Рисунок 5.3. – 3D-модель уличного светильника из самоуплотняющегося бетона на территории «Белого квартала»

Применение при разработке малых архитектурных форм таких принципов, как единство, баланс, ритм и контраст, помогает создавать визуально гармоничные и впечатляющие архитектурные проекты. Большое значение имеет сбор данных о потребностях пользователей пространством, контексте окружающей среды и функциональных требованиях. Принимая во внимание как эстетические, так и эргономические аспекты декоративного мелкозернистого бетона, дизайнеры могут создавать не только привлекательные, но и удобные, функциональные конструкции, которые способствуют комфортной среде пребывания человека.

С учетом вышеизложенного, в рамках данной диссертационной работы была разработана 3D-модель скамьи из декоративного мелкозернистого бетона на основе КВ с использованием ВКВП (20%) и мелкого заполнителя из отсева

дробления КВП, применительно к технологии аддитивного производства изделий (рисунок 5.4). Эргономичный дизайн скамьи органично сочетается с эстетическими соображениями, что помогает создавать функциональное и визуально привлекательное пространство.



Рисунок 5.4. – 3D-модель уличной скамьи для аддитивного производства

Таким образом, декоративный мелкозернистый бетон позволяет создавать конструкции, которые не только привлекательны внешне, но и функциональны, а также отвечают конкретным потребностям людей.

## **5.2 Техничко-экономические показатели на производство мелкозернистого бетона для малых архитектурных форм**

В результате научных исследований данной диссертационной работы было установлено, что процессы выветривания оказывают положительное влияние на процесс помола и структурообразования КВП. Этот факт дает существенную экономическую и экологическую эффективность в масштабе промышленного производства строительных материалов.

Применение подготовленных геологическими процессами ВКВП в стройиндустрии позволяет значительно снизить затраты на покупку первичных ресурсов и оптимизирует производственные расходы.

Повысилась конкурентоспособность за счет большей востребованности на рынке строительных изделий с меньшим углеродным следом, таких, как МАФ

из мелкозернистого бетона на КВ с минеральной добавкой ВКВП, подготовленного геологическими процессами.

Использование промышленных отходов для производства мелкозернистых бетонов стимулирует развитие перерабатывающей отрасли и создаёт новые возможности для инвестиций и повышения рентабельности.

Для оценки экономической эффективности разработанного самоуплотняющегося бетона (СУБ) и бетона для аддитивных технологий важно учитывать комплекс факторов, влияющих на конечную стоимость и эксплуатационные характеристики продукта.

Ниже приведены основные шаги и показатели, которые помогут провести сравнительный экономический расчет и обосновать целесообразность внедрения новых составов.

### **Основные критерии оценки экономической эффективности:**

#### **1. Экономия трудовых ресурсов.**

Использование разработанных смесей дает возможность снизить потребность в ручной обработке и уплотнении бетона, что снижает трудозатраты и повышает производительность работ. Например, внедрение СУБ позволит сократить рабочие смены или повысить объем выпуска изделий.

#### **2. Утилизация отходов:**

Применение ВКВП позволяет эффективно утилизировать техногенное сырье, существенно снижает экологическое воздействие и экономит средства на закупку первичного сырья.

#### **3. Качество продукции.**

Улучшение технических характеристик изделия (прочность, долговечность, теплоизоляция) способствует продлению срока службы конечных изделий.

Повышение качества поверхности бетона (меньше дефектов, меньше потребности в отделке);

#### **4. Общие экономические выгоды:**

- снижение стоимости транспортировки готового раствора (более жидкая консистенция СУБ облегчает транспортировку);

- ускорение сроков возведения конструкций благодаря улучшенной усадке и твердению бетона.

Для подтверждения экономической целесообразности использования ВКВП в качестве минеральной добавки для КВ представлен расчет стоимости материалов разных составов мелкозернистых бетонов для МАФ (таблицы 5.1 – 5.2).

Таблица 5.1

### Затраты на материалы на 1 м<sup>3</sup> самоуплотняющегося бетона

Компоненты смеси	Ед. измерения	Цена за 1 кг, руб	Расход на 1 м <sup>3</sup>	Сумма, руб
1	2	3	5	6
<b>Разработанный состав 1</b>				
ПЦБ 1-500-ДО ГОСТ 31108-2016	кг	24,2	550	13310
Тонкомолотый ВКВП	кг	0,48 (затраты на помол)	55	26,4
Тонкомолотый Мел МТД-1	кг	10	38,5	385
ГП Реопласт ПКЭ-1230	кг	190	6,05	1149,5
Песок	кг	1	1171,5	1171,5
Вода	л	0,03	192,5	5,775
Итого:				16005,3
<b>Состав на белом цементе для сравнения (сослаться на автора)</b>				
ПЦБ 1-500-ДО ГОСТ 965-89	кг	24,2	976	23,619,20
Отсев дробления кварцитопесчаника	кг	0,78	1148	895,44
Суперпластификатор MC-POWERFLOW 3100 RU	кг	120	15	1800
Микрокремнезем CENTRILIT FUME S	кг	30	49	1470
Вода	л	0,03	172	5,16
Итого:				27789,8
<b>Разработанный состав 2</b>				
ЦЕМ I 42,5 Н	кг	6,3	540	3402
Тонкомолотый ВКВП	кг	0,48 (затраты на помол)	54	25,92

ГП Реопласт ПКЭ-1230	кг	190	5,9	1121
Песок	кг	1	1566	1566
Вода	л	0,03	189	5,67
Фибра	кг	145	12	1740
			Итого:	7860,6
Состав фибробетона для сравнения				
ЦЕМ I 42,5 Н	кг	6,3	540	3402
ГП Реопласт ПКЭ-1230	кг	190	5,9	1121
Песок	кг	1	1566	1566
Вода	л	0,03	189	5,67
Фибра	кг	145	12	1740
Микрокремнезем CENTRILIT FUME S	кг	30	50	1500
Итого:				9334,8

Таблица 5.2

**Материальные затраты на изготовление 1 м<sup>3</sup> ЗД бетона (в ценах на январь 2025 года)**

Сырье и основные материалы:	Единицы измерения	Цена за 1 кг, руб	Расход на 1 м <sup>3</sup>	Сумма, руб.
Разработанный вариант 1				
ЦЕМ I 42,5 Н в составе КВ20В	кг	6,3	621,6	3916,08
ГП Линамикс ПК	кг	110	2,8	308
Отсев КВП АО «Лебединский ГОК»	кг	0,78	1166	524,7
Отсев ВКВП в составе КВ20В	кг	утилизация	155,4	–
ВВ «Полипласт АЭРО»	л	50	3,73	186,5
Вода	кг	0,03	350	10,5
				4945,78
Разработанный вариант 2				
ЦЕМ I 42,5 Н в составе КВ20В	кг	6,3	400	2520
ГП Линамикс ПК	кг	110	3,2	352
Отсев КВП АО «Лебединский ГОК»	кг	0,78	1500	675
Отсев ВКВП в составе КВ20В	кг	утилизация	100	–

ВВ «Полипласт АЭРО»	л	50	2,4	120
Вода	кг	0,03	275	8,25
3675,25				
Разработанный вариант 3				
ЦЕМ I 42,5 Н в составе КВ20В		6,3	633,6	3991,68
ГП Линамикс ПК		110	2,85	313,5
Кварцевый песок		1	1188	1188
Отсев ВКВП в составе КВ20В		утилизация	158	–
ВВ «Полипласт АЭРО»	л	50	3,8	190
Вода		0,03	324	9,72
5692,90				
Разработанный вариант 4				
ЦЕМ I 42,5 Н в составе КВ20В		6,3	400	2520
ГП Линамикс ПК		110	2,4	264
Кварцевый песок		1	1550	1550
Отсев ВКВП в составе КВ20В		утилизация	100	–
ВВ «Полипласт АЭРО»	л	50	2,4	120
Вода		0,03	250	7,5
4461,50				
Состав для сравнения 1				
ЦЕМ I 42,5 Н	кг	6,3	500	3150
Смесь фракции 0-10 мм из кварцитопесчаника АО «Лебединский ГОК»	кг	0,4	500	200
Песок	кг	1	1500	1500
СП Реламикс ПК	л	165	6	990
ВВ «Полипласт АЭРО»	л	50	3	150
Итого:				5990

Установлено, что процессы выветривания оказывают положительное влияние на процесс помола и структурообразования КВП. Данный факт дает

существенную экономическую и экологическую эффективность в масштабе промышленного производства строительных материалов.

### **5.3 Внедрение результатов работы**

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00866) с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

В ходе внедрения результатов теоретических и экспериментальных исследований, полученных при выполнении данной диссертационной работы, разработаны нормативно-технические документы.

Акт производства стелы из архитектурного бетона на основе композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника представлен в приложении А.

Технические условия архитектурного бетона на основе композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника представлены в приложении Б.

Технологический регламент на производство архитектурного бетона на основе композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника для 3D-аддитивного производства представлен в приложении В.

Протокол о внедрении с ООО «КЕЙКОД» при изготовлении стелы на территории «Борисовская керамика» в п. г. т. Борисовка Белгородской области представлен в приложении Г.

Протокол о внедрении с ООО «КЕЙКОД» при изготовлении композиции скалы «Истоки» в Екатеринбурге представлен в приложении Д.

Протокол о внедрении с ООО «КЕЙКОД» при изготовлении МАФ на основе научных разработок представлен в приложении Е.

Протокол о намерениях при рассмотрении выветренного кварцитопесчаника в качестве нового вида сырья стройиндустрии с геологическим факультетом МГУ им. М. В. Ломоносова представлен в приложении Ж.

Протокол о намерениях использования научных разработок по мелкозернистым бетонам с заменой части портландцемента на тонкомолотые минеральные добавки при производстве МАФ с компанией XINSHUN (Китай) представлен в приложении И.

Протокол о намерениях использования научных разработок по мелкозернистым бетонам с заменой части портландцемента на тонкомолотые минеральные добавки при производстве МАФ с компанией AL-ETIHAD READY MIXED CONCRETE (Саудовская Аравия) представлен в приложении К.

Протокол о намерениях с Генеральной подрядной компанией «Аль-Карнас» (Ирак) представлен в приложении Л.

Справка о внедрении теоретических положений в учебном процессе при подготовке студентов бакалавриата, обучающихся по направлению 08.03.01 «Строительство», образовательной программы «Производство строительных материалов, изделий и конструкций» представлена в приложении М.

Справка о внедрении теоретических положений в учебном процессе при подготовке студентов магистратуры, обучающихся по направлению 08.04.01 «Строительство» образовательной программы «Эффективные композиты для зеленого строительства» в рабочей программе «Технологии эффективных композитов для зеленого строительства» представлена в приложении Н.

#### **5.4. Выводы**

1. Таким образом, внедрение разработанных составов на основе ВКВП представляет собой эффективный способ повышения конкурентоспособности и

снижения себестоимости продукции за счет сокращения расхода клинкерной составляющей и повышения качества и долговечности готовых изделий.

2. Самоуплотняющиеся смеси облегчают процессы формовки и сборки конструкций сложной формы, уменьшая риски образования пустот и трещин, повышая долговечность объектов. Технология аддитивного производства (3D-печать) открывает новые горизонты архитектурного дизайна и позволяет создавать уникальные формы конструкций, ранее невозможные традиционными методами. Это увеличивает конкурентоспособность производителей и расширяет рынок сбыта.

3. Широкомасштабное внедрение разработанных составов бетонов как для 3D-печати, так и для производства самоуплотняющихся смесей с использованием ВКВП позволит получить существенный экономический, экологический и технологический эффект, что подтверждается экономическими расчетами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

*Итоги выполненного исследования.* Дополнены теоретические представления об энергосберегающих технологических процессах и методах создания мелкозернистых бетонов; управлении процессами структурообразования при использовании КВ с минеральной добавкой горных пород, подготовленных геологическими процессами, и мелкозернистого заполнителя из отсева дробления КВП зеленосланцевой степени метаморфизма, позволяющие получать мелкозернистые бетоны с высокими эксплуатационными характеристиками.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение КВ с требуемыми эксплуатационными характеристиками для мелкозернистых бетонов, способствующее повышению прочностных показателей при снижении доли цемента. Использование минеральной добавки из подготовленного геологическими процессами ВКВП, предварительно молотого в вибромельнице с последующим смешением полученного порошка с цементом (ПЦ) в соотношении (по массе) ВКВП:ПЦ равном 1:4 приводит к повышению активности КВ с использованием ВКВП на 13% по сравнению с ПЦ. При увеличении удельной поверхности ВКВП до значений  $S_{уд}=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$  и соотношении (по массе) ВКВП:ПЦ равном 1:9 показатели активности КВ с использованием ВКВП повышаются на 19% по сравнению с ПЦ. Применение КВ с минеральной добавкой ВКВП позволит получить широкую номенклатуру мелкозернистых бетонов для МАФ: самоуплотняющийся бетон на белом цементе ПЦБ 1-500-ДО (9% ВКВП), самоуплотняющийся фибробетон на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н (9% ВКВП), бетон для 3D-аддитивного производства на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н (20% ВКВП).

Установлен характер влияния минеральных добавок ВКВП (9% и 20%) на свойства смеси и процессы структурообразования мелкозернистых бетонов. Установлена зависимость активности КВ с минеральной добавкой тонкомолотого ВКВП от удельной поверхности и расхода данной добавки. При

$S_{уд}=500$  м<sup>2</sup>/кг расход ВКВП составляет 20%; при  $S_{уд}=1000$  м<sup>2</sup>/кг расход ВКВП - 9%. Введение минеральной добавки ВКВП обеспечивает уплотнение микроструктуры цементной матрицы и макроструктуры композита при экономии цемента, что позволяет получить визуально привлекательные МАФ для улучшения качества архитектурно-градостроительной среды. Данные факты объясняются процессами дополнительного структурообразования за счет связывания выделяющейся при гидратации клинкерных минералов СаО аморфным кремнеземом, присутствующим в ВКВП, и синтеза гидросиликатов кальция второй генерации.

Предложена феноменологическая модель структурообразования мелкозернистых бетонов на основе КВ с минеральной добавкой ВКВП, обусловленная формирующейся уплотненной структурой и повышенной адгезией цементной матрицы мелкозернистого бетона с минеральной добавкой ВКВП, на развитой поверхности которой формируются тонкие пленки гидратных фаз, взаимодействие с которыми приводит к упрочению контактной зоны между минеральной добавкой и цементным камнем.

Разработана технология получения КВ с показателями активности 62,1-69 МПа при замене 20% и 9% цемента на минеральную добавку ВКВП, полученную путем помола в вибромельнице.

Предложены составы смесей для получения самоуплотняющегося мелкозернистого бетона для МАФ при использовании КВ с минеральной добавкой ВКВП:

- мелкозернистый бетон на белом цементе ПЦБ 1-500-ДО с минеральной добавкой ВКВП (9%) и мела (7%) со следующими показателями: класс В30, марка по морозостойкости F150;

- мелкозернистый фибробетон на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н с минеральной добавкой ВКВП (9%) и стеклофибры (3%) со следующими показателями: класс В35, марка по морозостойкости F200.

Разработан состав смеси для получения мелкозернистого бетона для 3D-аддитивного производства на портландцементе ЦЕМ I 42,5 Н с минеральной

добавкой ВКВП (20%) и мелкого заполнителя из отсева дробления КВП зеленосланцевой степени метаморфизма со следующими показателями: класс В30, марка по морозостойкости не менее F100.

На основании выполненных исследований показана возможность использования подготовленных геологическими процессами ВКВП в качестве сырья для производства строительных композитов.

По результатам научно-исследовательской работы подготовленные геологическими процессами ВКВП отнесены в разряд полезных ископаемых.

Теоретические и практические результаты могут быть **рекомендованы** к внедрению на предприятиях по производству МАФ; при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

*Перспективы дальнейших исследований* целесообразно рассматривать в направлении изучения возможности совершенствования составов мелкозернистых бетонов с заменой части портландцемента на тонкомолотые минеральные добавки на основе ВКВП за счет управления процессами структурообразования, а также производства изделий различного назначения на их основе.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Суздальцева, А.Я. Бетон и архитектурная форма. М.: Стройиздат, 1972. — 123 с.
2. Zhutovsky, S. Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete / S. Zhutovsky, K. Kovler // Cement and Concrete Research. — 2012. - № 1. — P. 20-26.
3. Yu R. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPC) / R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers // Cement and Concrete Research. — 2014. - P. 29-39.
4. Столетова, И.А. Мелкозернистые бетоны для малых архитектурных форм на основе техногенного сырья // Университетская наука. — 2024. — №2 (18). — С. 81-85.
5. Суздальцева, А.Я. Бетон в архитектуре XX века. — М.: Стройиздат, 1981. - 214 с.
6. Баженова, С.И. Бетон высокой эксплуатационной надёжности // Технология бетонов. — 2011. — № 9–10. — С. 14–15.
7. Лесовик, Р.В. 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.
8. Лесовик, В.С. Сырьевая база промышленности строительных материалов: учеб. Пособие / В.С. Лесовик, В.М. Воронцов. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. — 207 с.
9. Лесовик, В.С. Генетические основы энергосбережения в промышленности строительных материалов // Изд. вузов. Строительство. — 1994. — № 7–8. — С. 96–100.
10. Зверев, В.М. Бетоны для изделий малых архитектурных форм / В.М. Зверев, Б.Н. Мельников, М.С. Шерстюков // Труды Псковского политехнического института. — 2011. — № 14.2. — С. 117–121.

11. Славчева, В.С. 1.2. Оценка экструдированности и формоустойчивости модифицированных цементных смесей для строительной 3D-печати / Г.С. Славчева, Артамонова О.В., Бабенко Д.С., Бритвина Е.А., Шведова М.А. // В книге: Современные проблемы строительства. Коллективная монография. Санкт-Петербург - Калининград, 2025. С. 21-32. Наназашвили И.Х. Элементы благоустройства и малые архитектурные формы из высокопрочного декоративного бетона // Технологии бетонов. — 2005. — № 3. — С. 20–21.

12. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (DBV), Bundesverband der Deutschen Zementindustrie (BDZ). Sichtbeton Exposed Concrete: Merkblatt, Fassung Juni [Электронный ресурс] URL: <https://www.betonverein.de> (дата обращения: 29.11.2017).

13. Cassar, L. Photocatalysis of Cementitious Materials: Clean Buildings and Clean Air [Электронный ресурс] URL: <https://link.springer.com/article/10.1557/mrs2004.99> MRS Bulletin (дата обращения: 29.11.2019).

14. These 13 Buildings Redefined Architecture in the Past 5 Years // Architecture+Design [Электронный ресурс] URL: <https://www.architecturaldigest.com/story/buildings-redefined-architecture-past-5-years> (дата обращения: 20.10.2022).

15. Салтыков, И.П. Создание комфортной среды обитания в помещениях жилых зданий с учетом архитектурных, инженерных и экологических аспектов // Вестник МГСУ. — 2012. — № 8. — С. 189–196.

16. Orbe, A. Framework for the design and analysis of steel fiber reinforced self-compacting concrete structures / A. Orbe, J. Cuadrado, R. Losada, E. Roji // Construction and Building Materials. — 2012. — P. 676–686.

17. Ferrara, L. Comprehensive Methodology to Test the Performance of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFR-SCC) / L. Ferrara, P. Vamonte, A. Caverzan, A. Musa, I. A. Sanal // Construction and Building Materials. — 2012. — № 37. — P. 406–424.

18. Шимко, В.Т. Архитектурное формирование городской среды. — М.: Высшая школа, 1990. — 223 с.
19. Баженов, Ю.М. Технология бетона: учебник. — 3-е изд. — М.: АСВ, 2003. — 500 с.
20. Карпова, Е.В. Влияние архитектурной среды на психологическое состояние человека / Е.В. Карпова, М.А. Мищенко, С.Б. Поморов // Вестник АлтГТУ им. И. И. Ползунова. — 2015. — № 1–2.
21. Иконников, А.В. Функция, форма, образ в архитектуре / под ред. А.В. Иконникова. — М.: Стройиздат, 1986. — 288 с.
22. Mardani-Aghabaglou, A. Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete / A. Mardani-Aghabaglou, M. Tuyan, G. Yilmaz, O. Arioz, K. Ramyar // Construction and Building Materials. — 2013. — P. 1020–1025.
23. Corinaldesi, V. Mechanical and thermal evolution of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes for engineering applications / V. Corinaldesi, G. Mariconi // Construction and Building Materials. — 2012. — № 1. — P. 289–294.
24. Иконников, А.В. Пространство и форма в архитектуре и градостроительстве. — М.: КомКнига, 2006. — 352 с.
25. Савельева, Н.Т. К исследованию проблемы эстетической организации среды / под ред. Л.И. Кирилловой // Принципы и средства композиции в современной архитектуре: сб. науч. тр. / ЦНИИП градостроительства. — М.: ЦНИИП градостроительства, 1979. — С. 88–92.
26. Сомов, Г.Ю., Раппапорт А.Г. Форма в архитектуре: проблемы теории и методологии. — М.: Стройиздат, 1990. — 344 с.
27. Лисичкин, Г.В., Чернов М.М. Человек и его среда обитания. — М., 2003. — 460 с.
28. Concrete coloring: basic principles leading to optimal results (Germany, LANXESS Deutschland GmbH) // BFT International. — 2012. — № 4. — P. 31–35.

29. Jawahar, J.G. Effect of coarse aggregate blending on short-term mechanical properties of self-compacting concrete / J.G. Jawahar, C.Sashidhar, I.V.R. Reddy, J. A. Peter // *Materials and Design*. — 2013. — P. 185–194.
30. Сомов, Г.Ю., Забельшанский Г.Б. Эмоциональное воздействие архитектурной среды и её организация // *Архитектура и эмоциональный мир человека*. — М.: Стройиздат, 1988. — 249 с.
31. Заха Хадид. *Архитектура нового времени*. — М.: ЭКСМО, 2019. — 425 с.
32. Чашемов, В. С., Чижиков А. Г. Композиционная добавка в бетоны с целью повышения их прочности // *Кооперация науки, образования, производства и бизнеса: новые идеи и перспективы безопасного развития в ближайшем будущем: материалы 3-й Всерос. науч.-практ. кластерной заочной электрон. конф.* — Тамбов, 2011. — С. 352–353.
33. Байер, В.Е. *Материаловедение для архитекторов* / В.Е. Байер, А.В. Ефимов, О.Г. Максимов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. — 2017. — № 8 (704). — С. 103–109.
34. Черепанова, И.А. Полифункциональный минеральный пигмент в технологии эффективных строительных композитов // *Уральский научный вестник*. — 2017. — № 12. — С. 71–76.
35. Воронцов, В.М. *Архитектурное материаловедение: учебник для СПО*. — 2-е изд., стер. — СПб.: Лань, 2021. — 408 с.
36. Лесовик, В.С. *Архитектурная геоника // Жилищное строительство*. — 2013. — № 1. — С. 9–12.
37. Лесовик, В.С. *Геоника (геомиметика): примеры реализации в строительном материаловедении*. — 2-е изд., доп. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. — 287 с.
38. Панксенов, Г.И. *Основы архитектурной колористики: учеб. пособие* / Г.И. Панксенов, О.Н. Чеберева, А.Г. Герцева, О.А. Лисина // *Нижегор. гос. архит.-строит. ун-т*. — Н. Новгород: ННГАСУ, 2019. — 62 с. — ISBN 978-5-528-00348-4.

39. Ситникова, Н.В. Колористика как основа формообразования в архитектуре: на примере работ мастеров XX века. — 2010.
40. Архитектура // Геометрия и искусств [Электронный ресурс]. — URL: <http://geometry-and-art.ru/arhkitecture.html> (дата обращения: 29.11.2017).
41. Moughtin, C., Ос Т., Tiesdell S. Urban Design: Ornament and Decoration. — Oxford: Architectural Press, 1999. - P. 123–128.
42. Лапунова, К.А., Гончарова Т.В. Архитектурная колористика в современной архитектуре и градостроительной деятельности. — Ростов н/Д, 2017.
43. Шенцова, О.М. Сочетания архитектурных форм // Архитектура. Строительство. Образование. — 2017. — № 1 (9). — С. 53–58.
44. Геометрия и архитектурные образы зданий и сооружений // mikroArticles.ru [Электронный ресурс]. URL: <http://www.microarticles.ru/article/geometrija-i-arhitekturnie-obrazi-zdaniij-i-sooryzhenij.html> (дата обращения: 28.11.2017).
45. Шенцова, О.М. Геометрический вид как свойство архитектурно-пространственных форм // Архитектура. Строительство. Образование. — 2015. — № 2 (6). — С. 46–52.
46. Шенцова, О.М. Влияние геометрии на формообразование в архитектуре и градостроительстве // Новые идеи нового века: материалы междунар. науч. конф. ФАД ТОГУ. — 2017. — Т. 1. — С. 414–426.
47. Кузнецова, Г.Н. Современный декор для современной архитектуры // Технологии строительства. — 2009. — № 4 (66). — С. 28–32.
48. Мейрамов, Д.Д. Изготовление архитектурных деталей из декоративных бетонов // Жилищное строительство. — 2005. — № 11. — С. 16–17.
49. Gibson, J.J. The Perception of the Visual World. — Boston: Houghton Mifflin, 1950. - P. 143–148.
50. Артамонова, О.В. Исследование адгезионной прочности в зоне контакта "цементная матрица - силикатное волокно" в композитах для

строительной 3D-печати / О.В. Артамонова, Г.С. Славчева, К.С. Котова, М.А. Шведова, П.Ю. Юров // В сборнике: Современные проблемы материаловедения. Сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции. Липецк, 2024. С. 278-283.

51. Бритвина, Е.А. Строительная 3D-печать в дизайне городской среды /Е.А. Бритвина, М.А. Шведова, Д.С. Бабенко // В сборнике: BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры. Материалы VI Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией А. А. Семенова. Санкт-Петербург, 2023. С. 142-148.

52. Лебедев, Ю.С. Архитектурная бионика / Ю.С. Лебедев, В.И. Рабинович, Е.Д. Положай и др.; под ред. Ю.С. Лебедева. – М.: Стройиздат, 1990. – 269 с.

53. Боженков, П.И. Комплексное использование минерального сырья и экология: учеб. пособие. – М.: АСВ, 1994. – 264 с.

54. Саврасов, И.П. Методические указания по применению архитектурных бетонов / И.П. Саврасов, И.М. Дробященко, В.В. Денискин, В.Ю. Сорокин, П.Н. Сиротин // М.: НИЦ «Строительство», 2019. – 75 с.

55. Негай, Г.А. Архитектурная среда и зрительная информация // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 6. – С. 138–144.

56. Забельшанский, Г.Б., Миневрин Г.Б., Раппапорт А.Г. Архитектура и эмоциональный мир. – М.: Стройиздат, 1985. – 208 с.

57. MasterBetona. Все о бетоне от А до Я [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://masterabetona.ru> (дата обращения: 01.10.2024).

58. Декоративный печатный бетон [Электронный ресурс]: технологии. – Режим доступа: <http://dekbeton46.ru> (дата обращения: 01.10.2024).

59. Баженова, О.Ю. Особенности технологии декоративных бетонов // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов: сб. докл. 19-х науч. чтений. Ч. 1. – Белгород: БГТУ, 2010. – С. 39–43.

60. Дворкин, Л.И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, С.М. Чудновский // Киев: Будивэльнык, 1991. – 136 с.
61. Дворкин, Л.Н., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. – СПб.: Строй-бетон, 2006. – 691 с.
62. Байер, В.Е. Архитектурное материаловедение: учебник для вузов. – М.: Архитектура-С, 2006. – 303 с.
63. Мозгалев, К.М. Самоуплотняющийся бетон: возможности применения и свойства / К.М. Мозгалев, С.Г. Головнев // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2011. – № 4. – С. 55–60.
64. Шаповалов, Н.Н. Самоуплотняющийся бетон на композиционном вяжущем с использованием сырьевых ресурсов КМА для устройства полов / Н.Н. Шаповалов, В.С. Лесовик, А.С. Милькина // Научно-технические инновации. – 2014. – С. 440–444.
65. Леушин, В.Ю. Применение самоуплотняющегося бетона в современном строительстве / В.Ю. Леушин, Б.И. Федотов, Н.С. Третьякова, М.А. Хвастин, Д.В. Гербер // Бюллетень строительной техники. – 2011. – № 6. – С. 46–49.
66. Бычков, М.В. Лёгкий самоуплотняющийся бетон как эффективный конструкционный материал / М.В. Бычков, С.А. Удодов // Научно-технические инновации. – 2013. – № 4. – С. 1–7.
67. Славчева, Г.С. Декоративный бетон повышенной физико-климатической стойкости для строительной 3D-печати / Г.С. Славчева, Е.А. Бритвина, М.А. Шведова, Д.С. Бабенко // Патент на изобретение RU 2767641 С1, 18.03.2022. Заявка № 2021124875 от 20.08.2021.
68. Славчева, Г.С. Двухфазная смесь на основе белого цемента для получения декоративного композита в технологии строительной 3D-печати / Г.С. Славчева, Е.А. Бритвина, М.А. Шведова, А.А. Полосина, Д.С. Бабенко, А.С. Андрияшкина // Патент на изобретение RU 2767805 С1, 22.03.2022. Заявка № 2021114995 от 25.05.2021.

69. Дятлов, А.К. Композиционное вяжущее для мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов / А.К. Дятлов, А.И. Харченко, М.И. Баженов, И.Я. Харченко // Технологии бетонов: Композит XXI век. – 2013. – № 3. – С. 40–43.
70. Александров, Я.А. Выбор сырьевых материалов для производства самоуплотняющихся бетонов // Технология бетонов. – 2011. – № 3–4. – С. 18–19.
71. Чан, Л.Х. Технологические свойства особо тяжёлых самоуплотняющихся бетонных смесей / Л.Х. Чан, Ю.М. Баженов, Л.Д. Чумаков // Вестник МГСУ. – 2011. – № 1–2. – С. 322–325.
72. Мозгалева, К.М. Самоуплотняющийся бетон: возможности применения и свойства / К.М. Мозгалева, С.Г. Головнев // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2011. – № 4. – С. 55–60.
73. Булдыжов, А.А. Самоуплотняющиеся бетоны с наномодификаторами на основе техногенных отходов / А.А. Булдыжов, Л.А. Алимов // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 8. – С. 86–88.
74. Калашников, В.И. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей / В.И. Калашников, О.В. Тараканов, Ю.С. Кузнецов, В.М. Володин, Е.А. Белякова // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 8. – С. 47–53.
75. Дятлов, А.К. Мелкозернистый самоуплотняющийся бетон с комплексной наносодержащей добавкой: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Моск. гос. строй. ун-т. – Москва, 2006. – 21 с.
76. Баженов, Ю.М. Мелкозернистые бетоны / Ю.М. Баженов., У.Х. Магдеев, Л.А. Алимов, В.В. Воронин, Л.Б. Гольденберг. – М.: Изд-во МГСУ, 1998. – 148 с.
77. Кузнецова, Н.В. Использование отходов литейного производства для получения мелкозернистых бетонов / Н.В. Кузнецова, И.И. Стерхов // Строительные материалы. – 2012. – № 6. – С. 15–16.
78. Tolstoy, A. Production of greener high-strength concrete using Russian quartz sandstone mine waste aggregates / A. Tolstoy, V. Lesovik, R. Fediuk, M.

Amran, M. Gunasekaran, N. Vatin, Y. Vasilev // *Materials*. — 2020. — Т. 13, № 23. — 5575. — DOI: 10.3390/ma13235575 (MDPI).

79. Samchenko, S. Self-compacting concrete as a modern solution to small architectural forms / S. Samchenko, O. Zemskova, I. Kozlova, M. Dudareva // *E3S Web of Conferences*. — 2021. — Vol. 258. — Article 09089. — DOI: 10.1051/e3sconf/202125809089 (e3s-conferences.org).

80. Yankovskaya, Y. Topical problems of green architecture, civil and environmental engineering / Y. Yankovskaya, S. Zavarikhin, Y. Kurbatov, Y. Pukharensko // в: *E3S Web of Conferences*. — 2020. — С. 05024.

81. Майорова, Л.С. Модифицированные мелкозернистые бетоны на основе техногенных отходов / Л.С. Майорова, Т.К. Акчурин, О.К. Потапова, В.В. Калаче // *Надёжность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов: материалы V междунар. науч.-техн. конф.* — Волгоград: ВолгГАСУ, 2009. — Ч. 1. — С. 170–174.

82. Лесовик, Р.В. Мелкозернистые бетоны для малых архитектурных форм; смеси с высокой проникающей способностью для строительства укрепленных оснований автомобильных дорог с использованием отходов КМА: монография / Р.В. Лесовик, В.Г. Голиков, Н.А. Шаповалов, Е.И. Назаренко // Белгород: Изд-во БГТУ, 2005. — 210 с.

83. Панченко, А.И. Мелкозернистые бетоны в монолитном строительстве: проблемы, теория и технология эффективного использования. Ч. 1 // *Технология бетонов*. — 2011. — № 5–6. — С. 42–44.

84. Дегтев, Ю.В. Самоуплотняющиеся бетоны на композиционных вяжущих для малых архитектурных форм: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дегтев Юрий Васильевич. — 2015. — 38 с.

85. Хренов, Г.М., Пухаренко Ю.В. Способ определения пластичности бетонной смеси и устройство для его осуществления: патент RU 2677234 С1. — Заявл. 01.12.2017. — Опубл. 16.01.2019.

86. ГОСТ Р ИСО 22309-2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Микроанализ электронно-зондовый. Количественный

анализ с использованием энергодисперсионной спектроскопии для элементов с атомным номером от 11 (Na) и выше. — Введён с 2016-06-01. — Утв. приказом Росстандарта от 06.07.2015 № 877-ст.

87. Лесовик, В.С. Классификация активных минеральных добавок для композиционных вяжущих с учётом генезиса / В.С. Лесовик, Л.Л. Шахова, Д.Э. Кучеров, Ю.С. Аксютин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2012. — № 3. — С. 10–14.

88. Камалова, З.А. Суперпластификаторы в технологии изготовления композиционного бетона / З.А. Камалова, Р.З. Рахимов, Е.Ю. Ермилова, О.В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета. — 2013. — № 8. — С. 148–152.

89. Курбатов, Ю.И. Природный ландшафт и архитектурная форма / Ю.И. Курбатов // Архитектура. Строительство. Дизайн. — 2005. — № 4. — С. 7–11.

90. Корниенко, Е.Д. Уникальные здания и сооружения / Е.Д. Корниенко, П. Попова // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2017. — № 4 (55). — С. 67–93.

91. Явинский, А.В. Кинетика набора прочности смешанного вяжущего / А.В. Явинский, И.Л. Чулкова // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. — 2023. — Т. 20. — № 1 (89). — С. 158–166.

92. Лесовик, В.С. Строительные материалы из отходов горнорудного производства Курской магнитной аномалии: учеб. пособие / В.С. Лесовик. — М.; Белгород: Изд-во АСВ, 1996. — 155 с.

93. Толстой, А.Д. Высокопрочные бетоны на композиционных вяжущих с применением техногенного сырья / А.Д. Толстой, В.С. Лесовик, К.Ю. Новиков // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2016. — № 2 (17). — С. 174–180.

94. Юрьев, А.Г. Дисперсноармированный мелкозернистый бетон с использованием техногенного песка / А.Г. Юрьев, Р.В. Лесовик, Л.А. Панченко // Бетон и железобетон. — 2006. — № 6. — С. 2–3.

95. Явинский, А.В. Анализ использования техногенных отходов в строительной отрасли / А.В. Явинский, И.Л. Чулкова, Д.О. Шишкин, Л.Ю. Парицкая // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. – Омск, 2022. – С. 478–481.

96. Явинский, А.В. Анализ зарубежного опыта переработки золошлаковых отходов / А.В. Явинский, И.Л. Чулкова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – Омск, 2021. – С. 423–427.

97. Рашупкина, М.А. Влияние водоредуцирующих суперпластификаторов и золы гидроудаления на свойства цементного камня / М.А. Рашупкина, А.В. Явинский, И.Л. Чулкова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. – № 3 (747). – С. 49–55.

98. 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.

99. Страхов, А.В. Композиционные материалы на основе местного природного и техногенного сырья / А.В. Страхов, М.М. Иняхин // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона: Сб. науч. трудов Всерос. науч.-практ. конф., Саратов, 2011. – С. 121–126.

100. Ключев, А.В. Техногенные пески как сырье для производства фибробетона / А.В. Ключев, Р.В. Лесовик // Международная науч.-практ. конф. «Инновационные материалы и технологии (20 научные чтения)»: Сб. докладов. Ч. 3. – Белгород, 2011. – С. 273–277.

101. 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.

102. Глаголев, Е.С. Высокопрочный мелкозернистый бетон на композиционных вяжущих и техногенных песках для монолитного

строительства: дис. канд. техн. наук: 05.23.05 / Глаголев Евгений Сергеевич. – Белгород, 2010. – 206 с.

103. Лукутцова, Н.П. Повышение экологической безопасности декоративного мелкозернистого бетона на основе использования техногенного глауконитового песка / Н.П. Лукутцова, О.А. Постникова, А.Н. Николаенко, А.А. Мацаенко, М.Ю. Тужикова // Строительство и реконструкция. 2014. № 1 (51). С. 79-84.

104. Зинченко, С.М. Оценка эффективности применения пластифицирующих добавок совместно с отходом производства керамзита для получения композиционных вяжущих / С.М. Зинченко, А.А. Иващенко // Сб. науч. трудов по материалам 2 Всерос. науч.-практ. конф. «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона». – Саратов, 2012. – С. 20–24.

105. Явинский, А.В. Кинетика набора прочности смешанного вяжущего / А.В. Явинский, И.Л. Чулкова // Вестник Сиб. гос. автомобильно-дорожного университета. – 2023. – Т. 20, № 1 (89). – С. 158–166.

106. Чулкова, И.Л. Основные способы увеличения времени подвижности бетонной смеси / И.Л. Чулкова, П.В. Волкова, Л.Ю. Парицкая, Д.О. Шишкин // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. – Омск, 2022. – С. 468–472.

107. Булучевский, Е.А. Бетонная смесь / Е.А. Булучевский, И.Л. Чулкова, В.Д. Галдина, Д.В. Храпов, Р.В. Есипенко. Патент РФ № RU2734752 С1 от 23.10.2020. Заявка № 2019129194 от 16.09.2019.

108. Чулкова, И.Л. Влияние органоволоконной добавки на структурообразование цементных композитов / И.Л. Чулкова, Л.В. Ильина, И.А. Селиванов // Эксперт: теория и практика. – 2024. – № 2 (25). – С. 44–51.

109. Пухаренко, Ю.В. Оценка эксплуатационной надежности высокопрочных бетонов / Ю.В. Пухаренко, А.Ю. Ковалева, А.С. Сидорова //

Современные перспективы строительства: Сб. науч. статей по материалам Молодежной науч. школы. – Калининград, 2023. – С. 27–38.

110. Зимовин, А.В. Изучение влияния пластифицирующих добавок на морозостойкость бетонов при строительстве гражданских зданий / А.В. Зимовин, И.Л. Чулкова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Омск, 2023. – С. 527–531.

111. Морозов, Н.М. Влияние компонентов песчаного бетона на воздухоовлечение при его приготовлении / И.В. Боровских, В.Г. Хозин, В.И. Авксентьев, Х.Г. Мугинов // Известия КазГАСУ. – 2011. – № 3. – С. 129–133.

112. Иващенко, С.И. Исследование влияния минеральных и органических добавок на свойства цементов и бетонов / С.И. Иващенко, А.Г. Комар и др. // Известия вузов. Строительство. – 1993. – № 9. – С. 16–19.

113. Тимашев, В.В. Свойства цементов с карбонатными добавками / В.В. Тимашев, В. И. Колбасов // Цемент. – 1981. – № 10. – С. 10–12.

114. Burgos-Montes, Olga. Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions / Olga Burgos-Montes, Marta Palacios, Patricia Rivilla, Francisca Puertas // Construction and Building Materials. – 2012. – № 31. – P. 47–56.

115. Ige, Oluwafemi E. Environmental Impact Analysis of Portland Cement (CEM1) Using the Midpoint Method / Oluwafemi E. Ige, Oludolapo A. Olanrewaju, Kevin J. Duffy, Obiora C. Collins // Department of Industrial Engineering, Durban University of Technology. – Durban 4001, South Africa. – April 2022, 15(7).

116. Ермилова, Е.Ю. Исследование влияния добавок карбонатных пород на физико-механические свойства композиционного цемента / Е.Ю. Ермилова, З. А. Камалова, Р. З. Рахимов, А. Г. Хантимиров, Д. А. Габбасов // Известия Казанского гос. арх.-строит. ун-та. – 2016. – № 4 (38). – С. 351–358.

117. Пухаренко, Ю.В. Гармонизация методов испытаний прочности и трещиностойкости фибробетона / Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, М.И.

Жаворонков // Санкт-Петербургский гос. арх.-строит. ун-т. – 2023. – № 9. – С. 338–343.

118. Klyuev, S.V. Fiber concrete for industrial and civil construction / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, T.A. Khezhev, Y.V. Pukharenko // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 945. – P. 120–124.

119. Klyuev, S.V. To the question of fiber reinforcement of concrete / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, T.A. Khezhev, Y.V. Pukharenko // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 945. – P. 25–29.

120. Klyuev, S.V. Fibers and their properties for concrete reinforcement / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, T.A. Khezhev, Y.V. Pukharenko // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 945. – P. 125–130.

121. Пухаренко, Ю.В. Анализ поведения фибробетона, армированного различными видами фибры, под нагрузкой / Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков // Санкт-Петербургский гос. арх.-строит. ун-т. – 2022. – С. 358–363.

122. ГОСТ Р 8.696–2010. Государственная система обеспечения единства измерений. Межплоскостные расстояния в кристаллах и распределение интенсивностей в дифракционных картинах. Методика выполнения измерений с помощью электронного дифрактометра. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2010. – 12 с.

125. Шорстова, Е.С. Базальтофибробетон для 3D-печати на основе композиционного вяжущего: диссертация кандидата технических наук / Шорстова Елена Степановна. – 2022. – 49 с.

126. High-strength fine-grained fiber concrete with combined reinforcement by fiber / Klyuev S.V., Klyuev A.V., Khezhev T.A., Pukharenko Y.V. // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Т. 13. – № S8. – С. 6407-6412.

127. Пухаренко, Ю.В. Сырьевая смесь для легкого фибробетона / Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, О.Ю. Пухаренко, Н.В. Фролов // Патент на изобретение RU 2734485 С1, 19.10.2020. Заявка № 2019133546 от 21.10.2019.

128. El-Died, A.S. Flow characteristics and acceptance criteria of fiber-reinforced self-compacted concrete (FR-SCC) / A.S. El-Died, M.M. Reda Taha // *Construction and Building Materials*. – 2012. – № 1. – pp. 585-596.

129. Пухаренко, Ю.В. Методы определения характеристик трещиностойкости фибробетона / Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков // В сборнике: *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2018 году*. – Москва, 2019. – С. 448-457.

130. Litzner, H.-U., Goldammer, K.-R. Philosophy of the new DBV/BDZ-code of practice “Architectural Concrete” [Philosophie des neuen DBV/BDZ-merkblattes “sichtbeton”] // *Beton- und Stahlbetonbau*. – 2005. – № 100 (6). – P. 489-495.

131. Hee, S. Architectural concrete with Dyckerhoff Weiss Design and execution of architectural concrete surfaces [Sichtbeton mit Dyckerhoff Weiss Planung und Ausführung von Sichtbetonflächen] // *Betonwerk und Fertigteil – Technik/Concrete Plant and Precast Technology*. – 2009. – № 75 (7). – P. 16-26.

132. Шеремет, А.А. Бетонные смеси для трехслойной параллельной 3D-печати: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шеремет Алена Анатольевна. – 2023. – 154 с.

133. Агеева, М.С. Актуальность 3D-печати в строительстве / М.С. Агеева, А.А. Матюхина // В сборнике: *Синтез науки и общества в решении глобальных проблем современности. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции*. – Стерлитамак, 2025. – С. 165-168.

134. Чекмарева, Е.В. Влияние добавки СП-1 на реологические свойства цементного теста / Е.В. Чекмарева, Т.В. Чекмарева, В.С. Новиков, И.Л. Чулкова // В сборнике: *Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции*. – 2019. – С. 465-468.

135. Булат, А.В. Аддитивное производство бетона в строительстве: проблемы и возможности при 3D-печати бетоном / А.В. Булат, А.Ф. Гордина // В сборнике: Выставка инноваций – 2020 (осенняя сессия). Сборник материалов XXX Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов. – 2021. – С. 31-38.

136. Шаталова, С.В. Разработка комплексного решения для 3D-печати стеновых конструкций / С.В. Шаталова, Н.В. Чернышева, В.С. Лесовик [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 10. – С. 8-19. – DOI 10.34031/2071-7318-2022-7-10-8-86.

137. Мухаметрахимов, Р.Х. Влияние активных минеральных добавок на свойства бетонов для 3D-печати / Р.Х. Мухаметрахимов // Цемент и его применение. – 2024. – № 1. – С. 38-43.

138. Leemann Andreas. Shrinkage and creep of SCC – The influence of paste volume and binder composition / Leemann Andreas, Lura Pietro, Loser Roman // Construction and Building Materials. – 2011. – № 5. – pp. 2283-2289.

139. Ma Baoguo. Rheological properties of self-compacting concrete paste containing chemical admixtures / Ma Baoguo, Wang Huixian // J. Wuhan Univ. Technol. – Mater. Sci. Ed. – 2013. – № 2. – pp. 291-297.

140. Rodriguez, V.I. Self-compacting concrete of medium characteristic strength / V.I. Rodriguez, Aguado de Cea Antonio, de Sensale Gemma Rodriguez // Construction and Building Materials. – 2012. – № 30. – pp. 776-786.

141. Баженов, Ю.М. Вяжущие низкой водопотребности с использованием отходов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов / Ю.М. Баженов, А.М. Гридчин, Р.В. Лесовик, В.В. Строкова // Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях. Материалы шестого международного симпозиума «Вопросы осушения и экология специальные горные работы и геомеханика». – Белгород: Изд-во ФГУП ВИОГЕМ. – 2001. – Ч. 2. – С. 557–561.

142. Corinaldesi Valeria. Combined effect of expansive, shrinkage reducing and hydrophobic admixtures for durable self-compacting concrete / Corinaldesi Valeria // *Construction and Building Materials*. – 2012. – pp. 758-764.

143. Kakooei Saeid. The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures / Kakooei Saeid, Akil Hazizan Md, Jamshidi Morteza, Rouhi Jalal // *Construction and Building Materials*. – 2012. – № 1. – pp.

144. Сычева, А.В. Ландшафтная архитектура / А.В. Сычева. – 2-е изд., испр. – М.: ООО «Издательский дом «ОНИКС 21 век», 2004. – 87 с.

145. Зубехин, А.П. Белый портландцемент, его роль в архитектурно-строительном дизайне, производство и применение / А.П. Зубехин, С.П. Голованова // *Цемент и его применение*. – 2010. – № 3. – С. 35-37.

146. Corinaldesi, Valeria. Mechanical and thermal evolution of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes for engineering applications / Corinaldesi Valeria, Mariconi Giacomo // *Construction and Building Materials*. – 2012. – № 1. – pp. 289-294.

147. Fontana Patrick. Heat curing and autoclaving of UHPC. New perspectives for the precast concrete industry / Fontana Patrick // *Institute für Baustoffe, Massivbau and Brandschutz der TUB Braunschweig. BFT Int.* – Germany. – 2011. – № 10. – pp. 46-47.

148. Karihaloo Bhushan Lal. Mix proportioning of self-compacting high- and ultra-high-performance concretes with and without steel fibres / Karihaloo Bhushan Lal, Ghanbari Akbar // *School of Engineering, Cardiff University, Cardiff. Mag. Concr. Res.* – UK. – 2012. – № 12. – pp. 1089-1100.

149. Баженова, С.И. Высококачественные бетоны с использованием отходов промышленности / С.И. Баженова, Л.А. Алимов // *Вестник МГСУ*. – 2010. – № 1. – С. 226-230.

150. Никулина, М.В. Использование отходов в качестве пигментов для изготовления декоративных бетонов / М.В. Никулина, А.В. Максаков // *Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона:*

Сборник научных трудов по материалам 2 Всероссийской научно-практической конференции, Саратов. – 2012. – С. 48-51.

151. Hegger, Josef. Новые материалы и формы конструкций находят свое применение на практике / Hegger Josef, Kulas Christian, Gallwoszus Joerg // Бетонный завод. – 2012. – № 2. – С. 32-33.

152. Мосаков, Б.С. Технологические мероприятия по экономии цемента в строительном производстве / Б.С. Мосаков, И.Л. Чулкова // В сборнике: Эффективные рецептуры и технологии в строительном материаловедении. Сборник Международной научно-технической конференции. Новосибирский государственный аграрный университет. – 2017. – С. 53-58.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

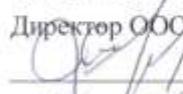
Акт производства стелы из бетона на основе композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника

Общество с ограниченной ответственностью  
ООО «КЕЙКОД»

308510 Белгородская область, Белгородский р-н, Дубовое п.,  
Заводская ул., дом 4Д, офис 3 оф.  
ИНН 3102050599, ОГРН 1213100013466  
Тел. 8-903-642-20-20, e-mail: bedanov@yandex.ru, buh@aclear.ru

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО «КЕЙКОД»

 А.А. Беданов

«10» марта 2025 г.

АКТ

Производства стелы из архитектурного бетона на основе композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника.

г. Белгород

«10» марта 2025 г.

Комиссия в составе: представители от ООО «КЕЙКОД»

директор А. А. Беданов

представители от БГТУ им. В.Г. Шухова

Зав. каф. СМиК, член корр. РААСН,

д-р техн. наук, проф. В.С. Лесовик

Доцент каф. СМиК, канд. техн. Наук М.С. Агеева

Ст. преподаватель каф. АиГ И.А. Столетова

участвовала в производстве стелы из архитектурного бетона на основе композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника (20 %) и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника для 3D-аддитивного производства.

Представители от ООО «КЕЙКОД»

Директор

А.А. Беданов

Представители от БГТУ им. В.Г. Шухова

Зав. каф. СМиК, член корр. РААСН,

д-р техн. наук, проф.

Доцент каф. СМиК, канд. техн. наук

Ст. преподаватель каф. АиГ

В.С. Лесовик

М. С. Агеева

И.А. Столетова

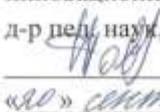


Титульный лист технических условий бетона на основе композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника

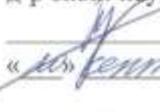
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
 БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
 им. В.Г. ШУХОВА  
 (БГТУ им. В.Г. Шухова)

**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ**

**СОГЛАСОВАНО:**

Проректор по научной и  
 инновационной деятельности  
 д-р пед. наук, профессор  
 Т.М. Давыденко  
 «20» сентября 2024 г.

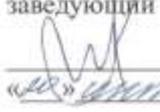
**УТВЕРЖДАЮ:**

Ректор БГТУ им. В.Г. Шухова,  
 д-р экон. наук, профессор  
 С.Н. Глаголев  
 «20» сентября 2024 г.

**АРХИТЕКТУРНЫЙ БЕТОНА НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННОГО  
 ВЯЖУЩЕГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫВЕТРЕННОГО  
 КВАРЦИТОПЕСЧАНИКА (20 %) И МЕЛКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ  
 ОТСЕВА ДРОБЛЕНИЯ КВАРЦИТОПЕСЧАНИКА ДЛЯ 3D-  
 АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Технические условия  
 СТО 02066339-076-2024

**РАЗРАБОТАН:**

Научный руководитель:  
 д.т.н., профессор,  
 заведующий кафедрой СМИнК  
 В.С. Лесовик  
 «20» сентября 2024 г.

**Исполнитель:**

ст. преподаватель каф. АиГ  
 И.А. Столетова  
 «20» сентября 2024 г.

Белгород 20, 24 г.

Титульный лист технологического регламента на производство бетона на основе композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника для 3D-аддитивного производства

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

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и  
инновационной деятельности,  
д-р пед. наук, профессор

  
Т.М. Давыденко  
«20» сентября 2024 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

на производство архитектурного бетона на основе композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника (20 %) и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника для 3D-аддитивного производства

СОГЛАСОВАНО

Директор ООО «КЕЙКОД»

  
А.А. Беданов

«20» сентября 2024 г.



РАЗРАБОТАНО

Научный руководитель:

д-р пед. наук, профессор каф. СМИиК

В.С. Лесовик

«20» сентября 2024 г.



Исполнитель:

ст. преподаватель каф. АиГ

И.А. Столетова

«20» сентября 2024 г.

Белгород 20 24 г.

Протокол о внедрении с ООО «КЕЙКОД» при изготовлении стелы  
на территории «Борисовская керамика» в п. г. т. Борисовка  
Белгородской области

**ПРОТОКОЛ О ВНЕДРЕНИИ**

г. Белгород

«25» марта 2025 г.

В диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 2.1.5 – Строительные материалы и изделия Столетовой И. А. на тему: «Архитектурный бетон с использованием техногенного сырья» разработаны формовочные смеси на основе композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника (20 %) и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника для 3D-аддитивного производства.

Результаты данных диссертационного исследования подтверждают, что разработанные составы формовочных смесей достаточно быстро набирают начальную прочность, что позволяет «отпечатанным» слоям без деформаций воспринимать нагрузку вышележащих слоев с необходимым интервалом времени между циклической печатью, а также обеспечить требуемое сцепление между слоями в течение заданного времени.

Нижеподписавшиеся стороны согласовали взаимодействие в процессе внедрения вышеизложенных разработок. Была изготовлена стела с использованием разработанных бетонных смесей, которая расположена на территории компании «Борисовская керамика» в п.г.т. Борисовка белгородской области.

**Представитель  
ООО «КЕЙКОД»**

Директор

Беданов А.А.  
«25» марта 2025 г.



**Представитель БГТУ**

им. В.Г. Шухова

д.т.н., профессор,

заведующий кафедрой СМИиК

Лесовик В.С.

«25» марта 2025 г.



**Протокол о внедрении с ООО «КЕЙКОД» при изготовлении  
композиции скалы «Истоки» в г. Екатеринбург**

**ПРОТОКОЛ О ВНЕДРЕНИИ**

г. Белгород

*«15» марта 2025 г.*

В диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 2.1.5 – Строительные материалы и изделия Столетовой И. А. на тему: «Архитектурный бетон с использованием техногенного сырья» (научный руководитель зав. кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций, член корр. РААСН, д-р техн. наук, профессор В.С. Лесовик) разработаны бетонные смеси для технологии 3D строительной печати, которые подтвердили высокую эффективность применения композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника (20 %) и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника для 3D-аддитивного производства, эффективные по комплексу свойств, эстетичности, долговечности, энерго- и ресурсосбережению.

В связи с вышеизложенным, мы, нижеподписавшиеся, представитель ООО «Кейкод» директор А.А. Беданов, и представитель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» зав. кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций, член корр. РААСН, д-р техн. наук, профессор В.С. Лесовик составили настоящий протокол о том, что полученные результаты использованы на производстве при изготовлении композиции скалы «Истоки», расположенной в г. Екатеринбург.

**Представитель  
ООО «КЕЙКОД»**

Директор

*А.А. Беданов*  
А.А. Беданов  
«15» марта 2025 г.



**Представитель  
БГТУ им. В.Г. Шухова**

д.т.н., профессор,

заведующий кафедрой СМИиК

Лесовик В.С.

*В.С. Лесовик*  
«15» марта 2025 г.



## Протокол о внедрении с ООО «КЕЙКОД» при изготовлении МАФ

### ПРОТОКОЛ О ВНЕДРЕНИИ

г. Белгород

«25» марта 2025 г.

В диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 2.1.5 – Строительные материалы и изделия Столетовой И.А. на тему: «Архитектурный бетон с использованием техногенного сырья» (научный руководитель зав. кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций, член корр. РААСН, д-р техн. наук, профессор В.С. Лесовик) разработаны формовочные смеси на основе композиционного вяжущего с использованием выветренного кварцитопесчаника (20 %) и мелкого заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника для 3D-аддитивного производства.

Результаты данных диссертационных исследований подтверждают, что внедрение разработанных материалов отвечает требованиям энерго- и ресурсосбережения, экологичности производства, так как снижается потребление портландцемента и невозобновляемых природных ресурсов. Развитие данного направления ощутимо способствует повышению эстетичности, удобства и комфорта искусственной среды обитания человека.

Нижеподписавшиеся стороны в пределах своей компетенции совместно и согласованно осуществляли взаимодействие при изготовлении МАФ на основе вышеизложенных разработок для «Брик-парк» в городе Белгород.

Представитель  
ООО «КЕЙКОД»

Директор

*А.А. Бодайлов*  
Бодайлов А.А.  
«25» марта 2025 г.



Представитель  
БГТУ им. В.Г. Шухова

д.т.н., профессор,

заведующий кафедрой СМИиК  
Лесовик



*В.С. Лесовик*  
«25» марта 2025 г.

Протокол о намерениях с геологическим факультетом  
МГУ им. М. В. Ломоносова

ПРОТОКОЛ О НАМЕРЕНИЯХ

«05» сентября 2025 г.

В диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 2.1.5 – Строительные материалы и изделия Столетовой И. А. на тему: «Мелкозернистые бетоны на композиционных вяжущих с минеральной добавкой выветренных кварцитопесчаников для малых архитектурных форм» (научный руководитель зав. кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций, член-корр. РААСН, д-р техн. наук, профессор В.С. Лесовик) разработана широкая номенклатура бетонов с заменой части портландцемента на тонкомолотые минеральные добавки на основе выветренных кварцитопесчаников.

Данное исследование актуально при рассмотрении выветренного кварцитопесчаника в качестве полезного ископаемого для стройиндустрии.

В связи с вышесказанным, мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий протокол о том, что полученные результаты диссертационной работы будут использованы при проведении совместных исследований, направленных на поиски и разведку месторождений выветренных кварцитопесчаников.

**Представители**  
МГУ имени М.В. Ломоносова

**Представитель**  
БГТУ им. В. Г. Шухова

Зам. декана по науке  
геологического факультета МГУ  
д.г.-м.н.

Первый проректор  
профессор, д.т.н.



Бобров А.В.



Евтушенко Е. И.

зав. кафедрой геологии, геохимии  
и минералогии полезных ископаемых  
геологического факультета МГУ  
профессор, д.г.-м.н.

*Starostin V.I.*

Старостин В.И.

## Протокол о намерениях с компанией XINSHUN (Китай)

### ПРОТОКОЛ О НАМЕРЕНИЯХ

*«22» августа 2015*

В диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 2.1.5 – Строительные материалы и изделия Столетовой И. А. на тему: «Архитектурный бетон с использованием техногенного сырья» (научный руководитель зав. кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций, член корр. РААСН, д-р техн. наук, профессор В.С. Лесовик) разработаны составы архитектурных бетонов с заменой части портландцемента на тонкомолотые минеральные добавки.

Наша компания заинтересована во внедрении полученных результатов, так как данные разработки очень актуальны для нашей страны и согласуются с реализацией вопроса по улучшению качества жизни человека с использованием бетонов на композиционных вяжущих с минеральными добавками.

связи с вышеизложенным, мы, нижеподписавшиеся Компания по продаже бетона Xinshun в городе Хулуньбэйр (呼伦贝尔市鑫顺混凝土销售有限公司), и представители ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» первый проректор, доктор технических наук, профессор Е.И. Евтушенко составили настоящий протокол о том, что полученные результаты будут использованы на производстве при изготовлении малых архитектурных форм.

**Представитель**  
Компания по продаже бетона  
Xinshun в городе Хулуньбэйр (呼伦  
贝尔市鑫顺混凝土销售有限公司)

*张景文*  
*«22» августа 2015*

**Представитель**  
**БГТУ им. В. Г. Шухова**  
Первый проректор, д-р техн. наук,  
проф.  
Евтушенко Е.И.

*Евтушенко*  
*«22» августа 2015*



Протокол о намерениях с компанией AL-ETIHAD READY MIXED  
CONCRETE (Саудовская Аравия)



الاتحاد  
JARAD  
للباطون الجاهز



Al-Etihad Ready Mixed Concrete Co. Ltd.

شركة الاتحاد  
للباطون الجاهز

ПРОТОКОЛ О НАМЕРЕНИЯХ

« 16 » Февраль 2025 г.

В диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 2.1.5 – Строительные материалы в издании Студеновой Н. А. на тему: «Архитектурный бетон с использованием техногенного сырья» (научный руководитель зав. кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций, член корр. РААСН, д-р техн. наук, профессор В.С. Лесовик) разработаны составы самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов

Данные разработки концептуально согласуются с интересами нашей компании в применении бетонов на композиционных вяжущих с минеральными добавками, значительно улучшающими качество окружающей среды, что очень актуально в нашей стране.

В связи с вышесказанным, членом коллектива Al-Etihad Ready Mixed Concrete Co. Director Company, Jarad K.M., и представителем ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» первый проректор, доктор технических наук, профессор Е.Н. Егущенко составили настоящий протокол в том, что полученные результаты будут использоваться на производстве при изготовлении малых архитектурных форм.

Представитель

Al-Etihad Ready Mixed Concrete Co. Director Company,

 Jarad K.M.

« 16 » Февраль 2025 г.

شركة الاتحاد للباطون ج م  
بيت لحم

Представитель

БГТУ им. В.Г. Шухова

Первый проректор, д-р техн. наук, проф.

Егущенко Е.Н.



بيت لحم – شارع القدس الخليل، تلفون: 02-2741004/5 فاكس: 02-2767969، ص. ب. 1036  
Bethlehem, Hebron-Jerusalem Street, Tel: 02-2741004/5 Fax: 02-2764969 P.O.Box 1036

Протокол о намерениях с Генеральной подрядной компанией  
«Аль-Карнас», (Ирак)



В диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 2.1.5 – Строительные материалы и изделия Столетовой И. А. на тему: «Мелкозернистые бетоны для малых архитектурных форм на композиционном вяжущем с минеральной добавкой выветренных кварцитопесчаников» (научный руководитель заведующий кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций, член корр. РААСН, д-р техн. наук, профессор В.С. Лесовик) разработаны составы архитектурных бетонов с заменой части портландцемента на тонкомолотые минеральные добавки.

Наша компания заинтересована во внедрении полученных результатов, так как данные разработки очень актуальны для нашей страны и согласуются с реализацией вопроса по улучшению качества жизни человека с использованием бетонов на композиционных вяжущих с минеральными добавками.

В связи с вышеизложенным, мы, нижеподписавшиеся Генеральная подрядная компания «Аль-Карнас» и представители ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» первый проректор, доктор технических наук, профессор Е.И. Евтушенко составили настоящий протокол о том, что полученные результаты будут использованы на производстве при изготовлении малых архитектурных форм.

  
**Представитель**  
Генеральная подрядная компания  
«Аль-Карнас»  
\_ Аль-Фарис А. Т.  
« 01 » 09 2025 г

  
**Представитель**  
**БГТУ им. В. Г. Шухова**  
Первый проректор, д-р техн. наук,  
проф.  
Евтушенко Е.И.  
« 01 » 09 2025 г.

**Справка о внедрении теоретических положений  
в учебном процессе при подготовке студентов бакалавриата**



**УТВЕРЖДАЮ**

Первый проректор

д-р техн. наук, проф.

Евтушенко Е.И.

« 25 » сентября 2025 г.

**СПРАВКА**

о внедрение результатов научно-исследовательской работы  
в учебный процесс

Теоретические положения диссертационной работы Столетовой И. А. на тему: «Мелкозернистые бетоны для малых архитектурных форм на композиционном вяжущем с минеральной добавкой выветренных кварцитопесчаников» используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» при подготовке студентов бакалавриата, обучающихся по направлениям 08.03.01 – Строительство, образовательной программы «Производство строительных материалов, изделий и конструкций».

д.т.н., профессор,  
зав. кафедрой «СМиК»  
БГТУ им. В. Г. Шухова

В. С. Лесовик

**Справка о внедрении теоретических положений  
в учебном процессе при подготовке студентов магистратуры**

**УТВЕРЖДАЮ**

Первый проректор  
д-р техн. наук, проф.

Евтушенко Е.И.

09 » сентября 2025 г



**СПРАВКА**

о внедрение результатов научно-исследовательской работы  
в учебный процесс

Теоретические положения диссертационной работы Столетовой И. А. на тему: «Мелкозернистые бетоны для малых архитектурных форм на композиционном вяжущем с минеральной добавкой выветренных кварцитопесчаников» используются в учебном процессе при подготовке студентов магистратуры, обучающихся по направлению 08.04.01 «Строительство» образовательной программы «Эффективные композиты для зеленого строительства» в рабочей программе «Технологии эффективных композитов для зеленого строительства».

Директор  
института магистратуры, канд.экон.наук  
«БГТУ им. В.Г. Шухова»

*И. В. Космачева*  
И. В. Космачева

