

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

На правах рукописи



БРИТВИНА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСЕЕВНА

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ
ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Славчева Галина Станиславовна,
доктор технических наук, профессор

Воронеж – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	14
1.1 Анализ опыта применения аддитивных технологий в строительстве.....	14
1.2 Анализ нормативной базы по проектированию составов бетонов	20
1.3 Анализ научных подходов проектирования составов бетонов для строительной 3D-печати.....	28
1.4 Разработка концепции научных исследований.....	38
1.5 Цель, задачи и блок-схема исследования	47
1.6 Выводы по главе 1.....	49
2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	51
2.1 Характеристика сырьевых компонентов	51
2.2 Этапы эксперимента и факторное пространство исследований	57
2.3 Методика реализации экспериментальных исследований	63
2.3.1 Методика оценки реологических и технологических свойств смеси	63
2.3.2 Методика комплексной оценки структуры и свойств бетонов.....	67
2.3.3 Методика промышленной апробации результатов исследования.....	69
2.4 Выводы по главе 2.....	74
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	75
3.1 Исследование влияния гранулометрического состава и концентрации заполнителя на реологическое поведение цементных систем	75
3.1.1 Результаты оценки реологического поведения цементных систем	76
3.1.2 Расчет параметров структуры цементных систем.....	83
3.1.3 Обоснование требований к параметрам структуры, критериальных для обеспечения технологичности смеси.....	87
3.2 Оценка влияния состава цементной матрицы на свойства мелкозернистых смесей	91

3.3 Разработка предложений по методике и алгоритму проектирования составов мелкозернистых бетонов для 3D-печати	99
3.3.1 Исходные положения для разработки методики проектирования	99
3.3.2 Методика проектирования составов мелкозернистых бетонов для 3D-печати.....	104
3.4 Выводы по главе 3.....	110
4 РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ДЕКОРАТИВНЫХ БЕТОНОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ.....	112
4.1 Проектирование составов декоративных бетонов.....	112
4.2 Исследование реологических и технологических свойств декоративных цементных смесей для строительной 3D-печати.....	116
4.3 Физико-механические свойства и физико-климатическая стойкость декоративных композитов для строительной 3D-печати	123
4.4 Выводы по главе 4.....	135
5 АПРОБАЦИЯ И ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	137
5.1 Разработка и апробация технологических решений.....	138
5.1.1 Технологические предложения и их апробация для производства сухих строительных смесей для 3D-печати.....	138
5.1.2 Опытно-промышленная апробация запроектированных составов декоративных бетонов при производстве 3D-печатных изделий.....	139
5.1.3 Рекомендации по технологии изготовления строительных изделий методом 3D-печати	145
5.2 Техничко-экономическая эффективность разработок	150
5.3 Выводы по главе 5.....	160
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	161
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	165
Приложение А. Результаты рентгенодифрактометрических исследований.....	181
Приложение Б. Протоколы независимых испытаний декоративных мелкозернистых бетонов для 3D-печати.....	190

Приложение В. Патент на изобретение №2767805 «Двухфазная смесь на основе белого цемента для получения декоративного композита в технологии строительной 3D-печати».....	202
Приложение Г. Технологический регламент производства сухих смесей строительных для строительной 3D-печати	203
Приложение Д. Акт внедрения в производство в ООО «СТРОЙСАНТЕХМОНТАЖ».....	217
Приложение Е. Акт внедрения результатов в производство в ООО «БЕТОНИК АРТ».....	219
Приложение Ж. Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс	220

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Аддитивные строительные технологии (3D-печати) реализуют цифровые, роботизированные, интеллектуальные производственные процессы, что отвечает приоритету 20а Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Помимо этого, технология 3D-печати отличается гибкостью и универсальностью, так как обеспечивает изготовление на одном и том же оборудовании широкой номенклатуры изделий, конструкций, строительных объектов.

Однако, в настоящее время отсутствует достаточная номенклатура смесей, что приводит к потребности получения новых композиционных материалов на основе цементных вяжущих, с целью придания им комплекса определенных технологических характеристик, адаптированных к технологическим режимам 3D-печати, и одновременно обеспечивающих возможность получения качественной конструкции, обладающей требуемыми эксплуатационными свойствами. Для решения данного вопроса необходимы научно обоснованные подходы к методам проектирования составов мелкозернистых бетонов.

Степень разработанности темы. Фундаментальные подходы к проектированию составов бетонов изложены в трудах Ахвердова И. Н., Баженова Ю. М., Гершберга О. А., Горчакова Г. И., Рыбьева И. А., Скрамтаева Б. Г. и др. Данные подходы позволили создать и нормировать методики подбора составов тяжелых и мелкозернистых бетонов. Но классические методики неприменимы для 3D-печатных бетонов из-за особых технологических характеристик смесей (перекачиваемость, экструдированность, формоустойчивость), которые принципиально отличаются от свойств традиционных бетонных смесей. Вопросы проектирования и создания составов бетонов для строительной 3D-печати рассматриваются в работах Mechtcherine V., Mohan M. K., Nerella V. N, Panda B., Perrot A., Rehman A. U., Russel N., Wolfs R., Zhang C, Мухаметрахимова Р. Х., Пустовгара А. П., Пухаренко Ю. В., Полуэктовой В. А., Недосеко И. В., Адамцевича А. О., Королева Е. В., Иноземцева А. С. В результате экспериментально получены и успешно апробированы десятки соста-

вов смесей для 3D-печати, которые обладают необходимыми для печати технологическими характеристиками. Однако отсутствуют единые подходы, общепризнанные методики, которые позволили бы аналогично классическим методам осуществлять проектирование и подбор составов бетонов на основании взаимосвязи «характеристики сырья – состав – свойства».

Объект исследования – мелкозернистые цементные бетоны для строительной 3D-печати.

Предмет исследований – закономерности взаимосвязи состава, структуры и реологических свойств готовых к употреблению смесей как основа проектирования составов бетонов для строительной 3D-печати.

Научная гипотеза. Предполагается, что исследование реологического поведения, специальных технологических свойств готовых к употреблению смесей для строительной 3D-печати позволит установить их количественную взаимосвязь с параметрами состава и структуры. На основании этого будет определен набор значений данных параметров, а также диапазон реологических и технологических свойств, критериальных для обеспечения пригодности смесей к печати. На этой основе предполагается разработать научно-обоснованные методику и алгоритм проектирования составов бетонов, адекватность и применимость которых будет доказана промышленными испытаниями.

Целью диссертационной работы является разработка научно-обоснованного метода проектирования составов мелкозернистых бетонов для строительной 3D-печати со специальными технологическими свойствами.

В соответствии с поставленной целью сформулированы следующие задачи исследований:

1. Проанализировать методы и подходы к проектированию составов бетонов для строительной 3D-печати.
2. Разработать концепцию проектирования составов бетонов с учетом специфики технологических свойств смесей.
3. Разработать методику и факторное пространство исследования.

4. Изучить влияния концентрации и характеристик мелких заполнителей, вида цементной матрицы на реологические характеристики смесей, критериальные для их пригодности к строительной 3D-печати.

5. Получить экспериментально-статистические зависимости «параметры состава и структуры – реологические характеристики смесей» как основу для проектирования составов бетонов.

6. Разработать методику, алгоритм и запроектировать составы мелкозернистых бетонов для 3D-печати.

7. Произвести оценку технологических свойств готовых к употреблению смесей и комплексную оценку качества бетонов для строительной 3D-печати, полученных на основе разработанных составов.

8. Разработать технологические решения по производству сухих строительных смесей, 3D-печати изделий и произвести их опытно-промышленную апробацию.

Связь работы с научными программами. Выполнение диссертационных исследований поддержано следующими научными программами и грантами:

1. Государственное задание Минобрнауки РФ по проекту 7.10781.2018/11.12 «Разработка концепции и технологической платформы создания строительных композитов для 3D-печати» (2018 – 2019 г.г.).

2. Программа «СТАРТ-1» (4 очередь) по проекту «3D-печать многофункциональных малых архитектурных форм», договор №3467ГС1/57495 с Федеральным государственным бюджетным учреждением «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (2020 – 2021 г.г.).

3. Государственное задание плана фундаментальных исследований РААСН и Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, тема 3.1.1.2. «Строительная механика и материаловедение 3D-печатных композитов» (2021 – 2022 г.г.).

Научная новизна работы. Обоснованы и экспериментально подтверждены решения, обеспечивающие получение мелкозернистых бетонов, отличающихся

специальными технологическими свойствами смесей для применения в технологии 3D-печати.

1. Впервые экспериментально установлена количественная взаимосвязь реологических и технологических характеристик мелкозернистой смеси с реологическим поведением цементной матрицы. Для обеспечения пластичности и агрегативной устойчивости в технологических процессах печати модели их реологического поведения должны быть сходными, смеси должны обладать способностью к вязкопластическому течению без разрушения структуры. Определены граничные требования к характеристикам смесей, которые обеспечивают экструдруемость и формоустойчивость. К реологическим характеристикам при действии сдвигающих напряжений отнесены значения оценки предела пластичности 1,0-2,5 кПа, структурной прочности 1-3 кПа, относительных пластических деформаций слоя не более 0,1 мм/мм; к технологическим – пластическая прочность 1,0-2,5 кПа.

2. Впервые предложен критериальный параметр структуры мелкозернистых смесей, фиксация значений которого в заданном диапазоне обеспечивает соответствие моделей реологического поведения мелкозернистой смеси и цементной матрицы. Экспериментально доказано, что таким параметром является отношение толщины прослойки цементной матрицы к среднему диаметру частиц заполнителя в диапазоне значений 0,15-0,21.

3. Определены ограничения по составу смесей, требования к мелким заполнителям, определяющие их технологическую пригодность к экструзии и безопалубочной послойной укладке. Установлено, что концентрация заполнителя в составе смеси должна находиться в диапазоне 110-140 % от массы цемента. При этом заполнитель должен быть полифракционного состава, в котором должно содержаться не менее трех стандартных фракций (0,16-0,315 мм, 0,315-0,63 мм, 0,63-1,25 мм, 1,25-2,5 мм и 2,5-5 мм), количество каждой фракции должно быть не более 75 % от общей массы заполнителя.

4. Получены экспериментально-статистические зависимости между отношением толщины прослойки цементной матрицы к среднему диаметру частиц запол-

нителя, реологическими характеристиками, оперативной характеристикой пластической прочности смесей, которые позволили разработать единые подходы и методику проектирования и подбора составов мелкозернистых бетонов для строительной 3D-печати на основании взаимосвязи «характеристики сырья – состав – технологические свойства смеси, эксплуатационные свойства композита».

Теоретическая и практическая значимость работы: развиты представления о направленном формировании структуры мелкозернистого бетона для строительной 3D-печати на микро- и мезомасштабных уровнях путем последовательного модифицирования состава цементной матрицы, состава и структуры мелкозернистой смеси с использованием геометрической модели структуры и экспериментально-статистических зависимостей «характеристики сырья – состав – структура – свойства».

Практическая значимость работы заключается:

- в разработке методики проектирования мелкозернистых бетонов для 3D-печати, которая устанавливает единый алгоритм подбора составов с учетом характеристик сырьевых компонентов и обеспечивает получение материалов с заданным комплексом технологических и эксплуатационных свойств;
- в разработке составов декоративного бетона для 3D-печати с имитацией текстуры искусственного камня. Получены материалы, характеризующиеся технологической пригодностью к печати; проектной прочностью 54-68 МПа, водопоглощением менее 1 %, морозостойкостью 200 циклов, влажностной усадкой менее 1,7 мм/м.
- в разработке технологического регламента производства сухих строительных смесей; рекомендаций по изготовлению строительных изделий методом 3D-печати.

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты исследований влияния характеристик и концентрации заполнителей на реологическое поведение мелкозернистых смесей.
2. Результаты исследований взаимосвязи между моделями реологического поведения, реологическими и технологическими характеристиками вязко-пластичных цементных матриц и мелкозернистых смесей.

3. Методику проектирования и подбора составов мелкозернистых цементных бетонов для 3D-печати.

4. Результаты проверки разработанной методики проектирования при получении и комплексной оценке свойств декоративных бетонов для 3D-печати.

5. Результаты апробации разработанных декоративных смесей при изготовлении изделий на промышленном 3D-принтере.

6. Технологические предложения по изготовлению строительных изделий методом 3D-печати, производству сухих смесей для аддитивных строительных технологий.

Методология и методы исследования включают системный анализ структуры и реологического поведения смесей для 3D-печати как вязко-пластичных дисперсных систем методами сдвливающей реометрии; статистический анализ полученных данных; верификацию предложенного метода проектирования состава бетона в процессе экспериментальных исследований и промышленных испытаний. Прочностные характеристики и показатели физико-климатической стойкости 3D-печатных композитов определяли в соответствии со стандартными методами оценки для бетонов по контрольным образцам.

Степень достоверности полученных результатов. Испытания реологических и физико-механических свойств проводились на современном аттестованном оборудовании в Центре коллективного пользования имени проф. Ю. М. Борисова ВГТУ. Полученные данные не отрицают общепризнанные факты и исследования других ученых. Серия экспериментальных исследований успешно проверена в производственных условиях.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на ежегодных научно-технических конференциях ВГТУ (2019-2021 гг., 2026 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций» (03-05 декабря 2019 г. Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва), Всероссийской научно-практической конференции «Военно-инженерное дело на Дальнем Востоке

России» (14-21 января 2020 г. Дальневосточный федеральный университет), Национальной молодежной научно-практической конференции "Молодые ученые - развитию национальной технологической инициативы" ПОИСК 2020 (22-24 апреля 2020 г. Ивановский государственный политехнический университет), Всероссийской научной конференции, посвящённой 90-летию выдающегося учёного-материаловеда, академика РААСН Ю. М. Баженова (01-02 октября 2020 г. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет), EECE-2020 International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (19-20 ноября 2020 г. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого), IV Международной научно-практической конференции «Современные строительные материалы и технологии» (25-28 мая 2021 г. Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта), Международной научно-практической конференции «Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование» (30-31 марта 2023 г. Ивановский государственный политехнический университет), VII Международной научно-практической конференции «Современные проблемы материаловедения» (26 февраля 2026 г. Липецкий государственный технический университет).

Разработки отмечены дипломом конкурса Федеральной службы по интеллектуальной собственности в номинации «100 лучших изобретений России за второе полугодие 2020 года»; серебряной медалью по итогам XXIV Московского международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед-2021».

Внедрение результатов работы. Методика проектирования составов и технологический регламент производства сухих смесей для строительной 3D-печати внедрен в производство на ООО «СТРОЙСАНТЕХМОНТАЖ». Технологические рекомендации по изготовлению строительных изделий методом 3D-печати внедрены в производственном цехе предприятия ООО «БетоникАРТ». Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «ВГТУ» при подготовке магистров направления 08.04.01 «Строительство», программы «Эффективные строительные конструкции и изделия, основания и фундаменты, инженерно-геологические изыскания».

Личный вклад автора заключается в определении актуальности темы диссертации, в постановке цели, задач исследования, выполнении программы экспериментов, анализе и обработке полученных результатов, написании текста диссертации, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, внедрении полученных результатов в практику, а также публикации результатов диссертации в научных изданиях.

Соавторы не возражают против использования соискателем совместных работ. Личный вклад Бритвиной Е. А. в полученных результатах составляет не менее 75 %.

Публикации. Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, опубликованы в 9 печатных работах, 2 из которых опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 1 статья в изданиях, входящих в наукометрическую базу Scopus и Web of Science, 4 статьи в отечественных индексируемых изданиях, 1 патент на изобретение.

Структура и содержание исследования. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 221 странице, содержит 35 рисунков, 44 таблицы, 7 приложений. Список литературы включает 147 наименований.

Область исследования диссертационной работы соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия, согласно паспорту специальности относится к пунктам:

1. Разработка и развитие теоретических и методологических основ получения строительных материалов неорганической и органической природы с заданным комплексом эксплуатационных свойств, в том числе специальных и экологически чистых.

15. Развитие теоретических основ и технологии получения вяжущих композиций и сухих строительных смесей различного назначения.

Благодарности. Автор выражает благодарность д.т.н., профессору кафедры химии и химической технологии материалов ВГТУ Артамоновой Ольге Владимировне, к.т.н., доценту кафедры химии и химической технологии материалов ВГТУ

Шведовой Марии Александровне за оказанное содействие при выполнении работы, а также сотрудникам Научно-образовательного академического центра строительного материаловедения и Центра коллективного пользования имени профессора Ю.М. Борисова ВГТУ за помощь при проведении экспериментальных исследований.

1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Потенциал и необходимость развития аддитивного строительного производства связаны с возможностью реализации уникальных строительных объектов, не унифицированных конструкций произвольной геометрии, с одной стороны, и снижением сроков и трудозатрат строительства, с другой стороны. Возросший интерес в исследовательской деятельности отмечен во многих работах [1-11] и подтверждается созданием и развитием предприятий, специализирующихся в области строительных аддитивных технологий [12-35].

Для постановки проблемы и разработки концепции исследований необходимо решить следующие задачи:

- 1) проанализировать опыт применения аддитивных технологий для выявления перспективных направлений развития и определения проблем, сдерживающих масштабирование технологии;
- 2) проанализировать методы и подходы, действующую нормативную базу по проектированию составов бетонов, определить возможность их применения и адаптации к задачам проектирования составов смесей и композитов для строительных аддитивных технологий;
- 3) проанализировать сформировавшиеся подходы, выявить нерешенные проблемы проектирования составов специализированных смесей и композитов для аддитивных строительных технологий (3D-печати).

1.1 Анализ опыта применения аддитивных технологий в строительстве

Для определения степени востребованности технологии строительной печати в мире был проведен анализ наиболее успешных и интенсивно развивающихся проектов, связанных с аддитивными строительными технологиями. Основные тематические направления деятельности компаний: производство строительных технологических комплексов для экструзионной безопалубочной печати, производство

строительных смесей и материалов, изготовление печатных изделий и объектов, полноцикловые технологические платформы, основанные на комплексном подходе к аддитивному строительному производству, как к замкнутому циклу «проектирование – оборудование – материал», исследовательские проекты (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Проекты, развивающие аддитивное производство в строительстве

Наименование компании, страна, год создания	Направление деятельности	Ссылка
Производители строительных технологических комплексов для экструзионной безопалубочной печати		
CyBe Construction, Нидерланды, 2013	CyBe Construction – занимаются разработкой ПО и оборудования для строительной отрасли в области 3D-печати.	[12]
Wasp 3D, Италия, 2012	Занимается разработкой и производством 3D-принтеров, печатающих натуральными материалами, такими как глина и песок. В 2021 году был напечатан и открыт магазин DIOR на пляже Наммос в Дубае. Благодаря возможностям тонкой печати (на основе глины), активно занимаются производством и продвижением элементов внутреннего декора.	[13]
COBOD International, Дания, 2018	Производитель модульных 3D-принтеров BOD2; активное сотрудничество с HeidelbergCement и PERI; участие в проектах многоэтажного строительства в Европе.	[14]
Vertico, Нидерланды, 2018	Проектирование и продажа 3D-принтеров для архитектурного бетона; печать скамеек, вазонов, мостовых элементов.	[15]
BetAbram, Словения, 2013	Линейка настольных и порталных строительных 3D-принтеров PNAP, собственное программное обеспечение для работы с цементными смесями.	[16]
ООО «Аркон», Россия, 2019	Разработка и выпуск среднеформатных строительных 3D-принтеров; печать малых архитектурных форм и конструктивных элементов из бетона.	[17]
Лерто, Россия, 2020	Производитель принтеров для 3D-печати цементными растворами в цеху. Специализируются на технологии сухой подачи.	[18]
Производители строительных смесей и материалов		
Sika AG, Швейцария, 1910 (в 3D с 2016)	Глобальный производитель строительной химии; разрабатывает и поставляет адаптированные бетонные смеси для различных систем 3D-печати.	[19]
Semex, Мексика, 1906 (в 3D с 2018)	Разработка линейки материалов D.fab для 3D-печати бетоном; сотрудничество с проектами по возведению малоэтажного жилья и малых архитектурных форм.	[20]
HeidelbergCement, Германия, с 1873 года (в 3D с 2016)	Производство цементных смесей для 3D-строительства; партнёрство с COBOD и PERI в жилых и коммерческих проектах.	[21]
ООО «3Д-Бетон», Россия, 2018	Производство специализированных сухих строительных смесей для 3D-печати (цементных и композитных), продажа готовых изделий и конструкций.	[22]

Продолжение таблицы 1.1

Наименование компании, страна, год создания	Направление деятельности	Ссылка
ООО «3Д-Бетон», Россия, 2018	Производство специализированных сухих строительных смесей для 3D-печати (цементных и композитных), продажа готовых изделий и конструкций.	[22]
Bruil prefab printing BV, Нидерланды, 2015	Расширили свою линейку смесей специальными архитектурными бетонами, предназначенными для элементов фасадов и сборных изделий. На Голландском фестивале Bruil представили разноцветные элементы напечатанных домов.	[23]
Группа компаний ГЕОБЕТОН, Россия, 2007	Производство смесей для 3D-строительства жилых и коммерческих зданий, создание фасадных и интерьерных архитектурных элементов, малых архитектурных форм и инженерных конструкций.	[24]
Korodur, Германия Совместно с CyBe работают с 2013	Korodur – производят строительные материалы различного назначения. Реализовали совместно с CyBe строительство объектов различного назначения в Кюрасао, Франции, Японии, ОАЭ, Нидерландах, Саудовской Аравии, Италии, Новой Зеландии, создавали элементы городского благоустройства и занимались восстановлением коралловых рифов.	[25]
Struxure (переименовано в 2026 году, ранее Black Buffalo 3D, США, 2019)	Производство бетонных «чернил» и консалтинг по внедрению печати; военные проекты и доступное жильё.	[26]
Производители печатных изделий, объектов и сооружений		
ChangeMaker 3D, Великобритания, 2017	Начав с проектирования и строительства домов в 2019 году, расширили перечень производимых продуктов: камера сточных вод, элементы объектов железнодорожной отрасли.	[27]
Смарт-Билд, Россия, 2017	Строительная компания, внедряющая 3D-печать бетоном в малоэтажное строительство; создание домов и зданий для Крайнего Севера.	[28]
ООО «БетоникАрт», Россия, 2024	Производство изделий из бетона методом строительной 3D-печати.	[29]
Полноцикловые технологические платформы, основанные на комплексном подходе к аддитивному строительному производству, как к замкнутому циклу «проектирование – оборудование – материал»		
Yingchuang Construction Technology (Shanghai) Co, Китай, 2003	Более 20 лет исследует и разрабатывает адаптированные к печати материалы: гипсовые, армированные стекловолокном, цементные и композитные	[30]
	Под брендом Winsun успешно производит и продает принтеры для строительной 3D-печати, способные за несколько часов напечатать здания высотой до 6 м.	
XtreeE, Франция, 2014	Разрабатывает и производит материалы и технологические комплексы для печати бетонами, а также уделяет большое внимание развитию и модернизации программного обеспечения, учитывающего особенности создания и модернизации моделей, адаптированных под пластичные смеси, наносимые методом послойной экструзии.	[31]

Продолжение таблицы 1.1

Наименование компании, страна, год создания	Направление деятельности	Ссылка
3D4Art, Россия, 2020	Оказывает комплекс услуг: консалтинг, разработка материалов для печати, проектирование и печать домов и МАФ. В 2025 году напечатали фельдшерский здравпункт в посёлке Дубки Московской области.	[32]
Группа компаний «АМТ» (СПЕЦАВИА), Россия, 2019	Крупнейший российский производитель строительных 3D-принтеров; возведение жилых домов в Ярославской области; разработка цементно-композитных смесей для печати.	[33]
Исследовательские проекты		
Contour Crafting Corporation, США, 1995	Занимается разработкой технологий для строительной 3D-печати. Основными направлениями развития печати первоначально были выделены строительные конструкции и элементы инфраструктуры, например, бетонные башни, в настоящее время, большое внимание уделяется строительству в космосе, учитывающее особенности грунтов и применяя особые «клеевые» вяжущие.	[34]
ICON, США, 2017	Занимаются разработкой авторских принтеров серии Vulcan и собственной бетонной смеси Lavacrete; строительство доступного жилья, в том числе в рамках партнёрства с NASA для лунных миссий.	[35]

Основные производители технологических комплексов [12-18] на текущий момент времени пытаются перешагнуть рубеж от производства единичных объектов к тиражируемому индустриальному оборудованию во всех направлениях: от компактных, применяемых в цеху машин, до крупноформатных, для печати здания целиком на строительной площадке. Однако, на наш взгляд, существует два основных сдерживающих фактора. Во-первых, отсутствие общих стандартов, предъявляемых к материалу, в каждом проекте применяется свой «родной» материал, поскольку принтер разработан под конкретный тип смеси, и это делает практически невозможным перестройку производственной линии под другой материал. Во-вторых, отсутствие регламентов для печатных объектов, изделий и конструкций, что усложняет совершенствование оборудования.

Производителей строительных смесей и материалов можно условно разделить на три направления:

- универсальные поставщики смесей, позиционируют свой продукт, как подходящий к любой системе печати [19-21];
- производители смесей для архитектурных и декоративных решений [22-24];
- производители специализированных смесей, привязанных к конкретным принтерам и проектам [24-26].

В качестве общего тренда у всех производителей прослеживается разработка рецептур смесей, обеспечивающих сохранность формы слоя после экструзии и высокую адгезию между слоями. Однако, стоит отметить, как и при создании принтеров, у производителей строительных смесей и материалов существуют сдерживающие факторы: отсутствие стандартных методов проектирования составов, испытаний смесей и ограниченный ассортимент выпускаемой продукции.

В отдельную группу стоит выделить производителей печатных изделий, объектов, конструкций и сооружений [27-29]. Данные компании производят конечный продукт с применением готовых технологических комплексов и подходящих для них строительных смесей, что значительно ограничивает область реализации аддитивных технологий. Данные ограничения определяются возможностью применяемого принтера и смеси, такие проекты рискуют попасть в ловушку зависимости от производителя оборудования, а главное в зависимость от конкретного производителя смесей. Это значительно тормозит развитие открытого рынка смесей для строительной экструзионной безопалубочной печати.

Одними из самых эффективных компаний, которые работают над самыми заметными пилотными проектами, являются полноцикловые технологические платформы [30-33], они реализуют ключевой принцип аддитивного строительного производства – замкнутый цикл «проектирование – оборудование – материал». При таком подходе возможно одновременно учитывать особенности смесей, подходящих для печати, технологические возможности оборудования, способного реализовать процесс экструзии и формирования слоя, а также вид получаемого изделия, объекта или конструкции. Основные проблемы, с которыми сталкиваются такие предприятия: сложность одновременного развития перечня компетенций (архитектура, материаловедение, машиностроение, программное обеспечение) и недостаток

масштабирования, поскольку для массового внедрения производства необходима определенная стандартизация оборудования и унификация применяемых материалов, чтобы не зависеть только от одного производителя, а иметь возможность выбора и расширения палитры используемых смесей. Как правило, применяемые материалы в производственном цикле «проектирование – оборудование – материалы» создаются под индивидуальный конкретный проект и применяемый технологический комплекс, конкретную сырьевую базу путем опытного подбора.

Отдельную группу представляют исследовательские проекты [12, 34, 35]. Например, компания CyBe реализует проект по восстановлению коралловых рифов, а Contour Crafting и ICON занимаются изучением технологий печати в условиях невесомости и исследованием применяемых материалов на основе лунных пород. Данные решения занимают очень узкую нишу в строительных аддитивных технологиях и совсем не применимы в условиях обычных строительных площадок и производственных цехов.

Из рассмотренного перечня видно, что в большинстве случаев программное обеспечение является индивидуальным решением, которое жестко привязано к конкретному технологическому комплексу, соответственно, весь технологический процесс требует повторной адаптации при замене оборудования.

Как и программное обеспечение, сами принтеры имеют существенные отличия – по рабочей схеме, объему и способу подачи материала, и типу используемого сырья. У большинства производителей оборудование замкнуто на своем подходящем материале.

Среди производителей материалов для строительной печати можно выделить две основных стратегии: «закрытые» смеси, привязанные к своим технологическим комплексам, и «открытые» смеси, позиционируемые для применения в различных принтерах. «Закрытые» смеси позволяют добиться рациональной производительности на принтере, под который она создана, однако практически исключают возможность применения на оборудовании других производителей. Как показывает практика, существует определенный набор технологических требований, который

ограничивает «открытость» смесей при применении различных принтеров: скорость подачи материала, толщина экструдированного слоя, временные интервалы между нанесением слоев, соответственно, одна и та же смесь требует корректировки под применяемое оборудование.

Таким образом, можно сделать вывод о явном дефиците существующих смесей, пригодных для строительных аддитивных технологий. Ассортимент универсальных и доступных потребителю строительных смесей не покрывает полностью рыночные потребности.

На основании анализа направлений внедрения и потребностей строительной сферы можно заключить, что проблемы, с которыми сталкивается производство при внедрении и масштабировании аддитивных технологий в строительстве, возникают на каждом этапе производственного цикла «проектирование – оборудование – материалы». При этом основной проблемой, сдерживающей развитие и масштабирование отрасли, является отсутствие единых стандартов и унификации оборудования и применяемых материалов. Требуется формирование общих подходов, универсальных принципов разработки составов смесей, которые бы позволили адаптировать конкретную сырьевую базу к параметрам отличающихся технологических комплексов и задач конкретных проектов.

На этой основе требуется увеличение номенклатуры применяемых смесей, определение и регламентирование их основных свойств, утверждение методики испытаний, что качественно повысит уровень развития и ускорит объем внедрения строительных аддитивных технологий.

1.2 Анализ нормативной базы по проектированию составов бетонов

Для получившей наибольшее практическое применение разновидности аддитивных строительных технологий, экструзионной безопалубочной 3D-печати, критериями являются технологические характеристики готовых к употреблению смесей, способные обеспечить формирование бездефектного экструдированного слоя, безопалубочного возведения строительного объекта [36-38].

В научной литературе [38-43] в отношении технологических характеристик смесей, применяемых в экструзионной безопалубочной строительной печати, однозначно сформирован их набор, позволяющий определить пригодность смеси к данной технологии:

- 1) перекачиваемость (pumpability) – способность смеси, обеспечивающая ее транспортировку от места приготовления к экструдеру;
- 2) экструдированность (extrudability, printability) – способность смеси формировать бездефектный печатный слой в процессе экструзии;
- 3) формоустойчивость (shape retention) – способность слоя сохранять свою форму после экструзии;
- 4) работоспособность (buildability, workability) – способность слоя сохранять свою форму под давлением от вышележащих слоев;
- 5) сохранность свойств (open time) – способность смеси сохранять свою пригодность к печати до завершения процесса создания объекта.

Основными стандартами, регламентирующими технологические параметры традиционных строительных смесей, являются ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия», ГОСТ 31357-2007 «Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Общие технические условия», и параметры их оценки, согласно ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний».

Согласно ГОСТ 7473-2010 бетонные смеси характеризуются следующими технологическими показателями качества: удобоукладываемость, средняя плотность, расслаиваемость, пористость, температура, сохраняемость свойств во времени, объем вовлеченного воздуха. При этом часть показателей качества бетонных смесей, такие как средняя плотность, расслаиваемость, пористость, температура и объем вовлеченного воздуха, не зависят от технологии их применения, и могут быть применены и для бетонов, используемых в технологии строительной печати.

Аналогично, согласно ГОСТ 31357-2007, основными показателями качества смесей, готовых к применению должны быть: подвижность, сохраняемость первоначальной подвижности, водоудерживающая способность и объем вовлеченного

воздуха. Водоудерживающая способность и объем вовлеченного воздуха, также, как и в бетонах, не влияют на особенности технологического процесса.

Однако по ряду технологических показателей есть существенные отличия как по самим свойствам и их показателям, так и по количественным характеристикам оценки между классическими бетонами и бетонами, применяемыми в строительных аддитивных технологиях (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Анализ применимости технологических показателей строительных бетонов для технологии 3D-печати

Свойства	Показатели оценки свойства	Количественная характеристика показателя	Применимость для 3D-печати
Удобоукладываемость	Подвижность	Осадка стандартного конуса, отформованного из бетонной смеси, см (ГОСТ 10181-2014)	Показатель не применим. При безопалубочной печати необходимо обеспечить устойчивость сформированного методом экструзии слоя
	Жесткость	Время вибрации, необходимое для выравнивания бетонной смеси и появления цементного теста в отверстиях прибора, с (ГОСТ 10181-2014)	
	Распływ бетонной смеси	Величина расплыва на встряхивающем столе, мм (ГОСТ 10181-2014)	Показатель частично применим для оценки текучести
	Степень уплотняемости	Разность высот бетонной смеси в форме до и после ее уплотнения, мм (ГОСТ 10181-2014)	Показатель не применим. Формирование печатного слоя происходит уплотненной подающим устройством смесью
Сохраняемость свойств во времени	Подвижность, жесткость, распływ, степень уплотняемости	Оценка данных об изменении свойств в течении определенного времени (ГОСТ 10181-2014)	Применимо свойство, показатели не применимы. В процессе печати также необходима оценка изменения особых технологических свойств
	Сохраняемость первоначальной подвижности	Определяется временем сохранения первоначальной подвижности, мин (ГОСТ 31357-2007)	

Анализ технологических показателей, нормируемых стандартами, показал, что в традиционных строительных технологиях набор технологических характеристик готовых к употреблению смесей определяется необходимостью заполнения объема формы или опалубки, что не соответствует концепции экструзионной безопалубочной печати. Технологические характеристики смесей для 3D-печати принципиально отличаются от нормированных свойств традиционных бетонных смесей, а методы и количественные характеристики оценки показателей имеют только частичное применение для оценки материалов, используемых в строительных аддитивных технологиях.

Данное несоответствие технологических свойств смесей для 3D-печати и традиционных бетонных смесей определяет необходимость анализа пригодности классических методов проектирования составов бетонов к специализированным задачам экструзионной безопалубочной печати.

Проектирование составов бетонов на территории Российской Федерации регламентируется ГОСТ 27006-2019 «Бетоны. Правила подбора состава». Первым этапом при этом является формирование задания на проектирование. В таблице 1.3 проанализирована возможность подготовки задания на проектирование бетона для строительной экструзионной безопалубочной печати в рамках рассматриваемого нормативного документа.

Таблица 1.3 – Анализ параметров подбора состава бетона по ГОСТ 27006-2019 «Бетоны. Правила подбора состава»

Пункты задания на подбор состава бетона	Классические бетоны, применяемые для литевых технологий	Бетоны, применяемые в аддитивных строительных технологиях
Назначение бетона	Сборные и монолитные конструкции, товарный бетон	Отличаются от классических. Безопалубочная экструзионная печать изделий и конструкций
Условия твердения	Нормально-влажностные условия до достижения промежуточного и/или проектного возраста, в условиях термо-влажностной обработки	Отличаются от классических. В естественных условиях

Продолжение таблицы 1.3

Пункты задания на подбор состава бетона	Классические бетоны, применяемые для литевых технологий	Бетоны, применяемые в аддитивных строительных технологиях
Нормируемые показатели качества бетонных смесей	Удобоукладываемость, средняя плотность, расслаиваемость, пористость, температура, сохраняемость свойств во времени, объем вовлеченного воздуха (ГОСТ 10181-2014, ГОСТ 31357-2007)	Частично отличаются от классических. Подходят по показателям средней плотности, расслаиваемости, пористости, температуры, объему вовлеченного воздуха. Отличаются по особым технологическим показателям экструзионной безопалубочной печати
Нормируемые показатели качества бетона	Прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, истираемость (ГОСТ 26633-2015)	Отличаются от классических, т.к. не учитывается слоистость конструкции
Ограничения по составу бетона и применяемых материалов	Цементы, заполнители (крупной и мелкой фракции), добавки и вода	Частично отличаются от классических. В составах смесей не применяют заполнитель с размером фракции более 10 мм
Параметры оптимизации	Технологические характеристики бетонных смесей, физико-механические характеристики бетона, технико-экономические показатели производства	Отличаются от классических. Особые технологические характеристики смесей, которые не учитываются в технологических показателях смесей по ГОСТ 7473-2010 и ГОСТ 31357-2007, в ГОСТ 26633-2015 – не учитывается слоистость изделия

По результатам анализа видно, что даже на этапе формирования задания на проектирование возникает ряд разночтений, которые заведомо дают возможность предположить невозможность применения данного ГОСТ 27006-2019 для подбора составов бетона для аддитивных технологий.

Фундаментальные подходы к проектированию составов бетонов изложены в трудах Ахвердова И. Н., Баженова Ю. М., Гершберга О. А., Горчакова Г. И., Рыбьева И. А., Скрамтаева Б. Г. и др. Данные подходы позволили создать и нормировать методики подбора составов тяжелых и мелкозернистых бетонов.

Методика расчета состава тяжелых бетонов зависит от условий их твердения: в условиях тепловой обработки или в нормальных тепловлажностных условиях. Однако можно выделить основные общие этапы, характерные для бетонов, подвергающихся тепловой обработке и нет:

1. Определение номинального цементно-водного отношения (Ц/В) в зависимости от требуемой прочности бетона и активности или марки цемента.
2. Расход воды для начального состава в зависимости от удобоукладываемости бетонной смеси, вида и крупности заполнителя.
3. Расход цемента в килограммах на основе установленных Ц/В и расхода воды.
4. Абсолютный объем заполнителей, зависящий от расходов воды и цемента.
5. Количество мелкого заполнителя, зависящего от истинных плотностей зерен песка и щебня, а также расхода цемента и наибольшей крупности заполнителя с учетом удобоукладываемости бетонной смеси и крупности песка.
6. Количество крупного заполнителя, в зависимости от абсолютного объема заполнителей и песка.
7. Экспериментальная проверка удобоукладываемости начального состава бетона и его корректировка при необходимости.
8. Оптимизация состава по критерию минимального расхода цемента и расчет двух вспомогательных составов, проверка удобоукладываемости для выбора оптимального состава.
9. Изготовление контрольных образцов из оптимального состава для определения прочности в проектном возрасте.
10. Дополнительные составы с измененными значениями Ц/В, с сохранением расхода воды и крупного заполнителя в соответствии с оптимальным составом. В этих составах определяют удобоукладываемость, плотность, фактические расходы материалов и изготавливают из них контрольные образцы.
11. По результатам испытаний всех контрольных образцов строят базовые номограммы – зависимости прочности от Ц/В. По полученным зависимостям определяют значение Ц/В, обеспечивающее получение бетона с заданной прочностью.
12. На основании определенного Ц/В, средней фактической плотности бетонных смесей, расхода воды и крупного заполнителя рассчитывают количество цемента и мелкого заполнителя для номинального состава бетона.

При подборе составов мелкозернистых бетонов расчет аналогично тяжелым начинается с определения Ц/В в зависимости от требуемой прочности и активности или марки цемента. Дальнейший расчет отличается отсутствием крупного заполнителя, а массовое соотношение песка и цемента принимается в зависимости от требуемой удобоукладываемости бетонной смеси и водоцементного отношения (В/Ц). После определения расхода цемента, песка и воды, начальный состав проверяют на опытном замесе с целью проверки удобоукладываемости. Аналогично расчету тяжелых бетонов из начального и дополнительных составов мелкозернистых бетонов изготавливают контрольные образцы для определения прочности, строят зависимости прочности от Ц/В, определяют Ц/В, обеспечивающее получение бетона с заданной прочностью, и рассчитывают номинальный состав бетона.

Основными критериальными свойствами, на которых базируются методики проектирования составов тяжелых и мелкозернистых бетонов, являются требуемая удобоукладываемость и прочность. А как показал анализ возможности оперировать данными параметрами применимо к смесям, используемым в аддитивных строительных технологиях (см. табл. 1.3), можно сделать вывод о частичном несоответствии существующих методик проектирования составов применительно к составам мелкозернистых бетонов для строительных аддитивных технологий.

В методиках проектирования тяжелых бетонов расход основных компонентов зависит от крупности заполнителя, и в качестве основного контрольного свойства используется удобоукладываемость, что не дает возможности проектировать составы смесей для строительной печати с её использованием.

При проектировании составов мелкозернистого бетона соотношение между основными компонентами смеси (цементом и песком) определяется в зависимости от требуемой подвижности или удобоукладываемости цементно-песчаной смеси при определенном водоцементном отношении, а также, крупности песка. Данная методика применима к строительным аддитивным материалам в части исходных компонентов, поскольку в технологии 3D-печати преимущественно используют мелкозернистые смеси с размером зерен заполнителя не более 5 мм, что обусловлено пустотелостью создаваемых строительных объектов с толщиной печатной оболочки 3-5 см.

Таким образом, в классической методике проектирования составов мелкозернистых бетонов критериальными факторами являются их прочность и удобоукладываемость, а при безопалубочной печати сама возможность создания строительного объекта определяется свойствами свежеприготовленной смеси. Поэтому при проектировании состава бетонов для 3D-печати критериальными следует считать именно технологические характеристики готовых к употреблению смесей. Одновременно установлено, что нормируемые технологические параметры традиционных бетонных смесей не применимы к смесям для строительной 3D-печати. Поэтому традиционные методы, нормированные правила подбора состава мелкозернистых бетонов, не могут быть использованы для проектирования составов бетонов для 3D-печати.

Учитывая общепринятые основные технологические характеристики смесей для строительной печати, отличающие их от классических бетонов, и с учетом значительных разногласий в методиках проектирования и испытаний, необходимо введение специализированных норм.

Для аддитивного строительного производства на территории Российской Федерации введено в действие три национальных стандарта:

- ГОСТ Р 59095-2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Термины и определения»;
- ГОСТ Р 59096-2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Методы испытаний»;
- ГОСТ Р 59097-2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Технические требования».

Анализ содержания действующих стандартов с точки зрения регламентированности методов подбора состава показал следующее.

В стандартах сформулированы основные термины и определения в области материалов, изготовление которых учитывает их применение в технологии аддитивного строительного производства. Изложены общие требования к качеству материалов для аддитивного строительного производства (АСП) и методам их испы-

таний в состоянии сухой смеси, готовых к применению подвижных смесей и получаемого композита. Не представлены конкретные численные значения и параметрические ряды показателей качества сухих смесей, растворных (бетонных) смесей для АСП. Для требований к показателям качества растворных (бетонных) смесей указывается, что такие требования должны определяться их назначением, при этом, не указаны нормативные документы, определяющие виды назначения. В стандартах отсутствуют разделы, определяющие методики подбора состава смеси в целом или её отдельных компонентов.

Требования к качеству готовых к применению смесей регламентируют контроль подвижности, сохраняемость первоначальной подвижности, стойкость к оплыванию, прокачиваемость, сроки начала и окончания схватывания, водоудерживающую способность, что отличается от общепризнанных в мировой практике основных технологических характеристик смесей – экструдируемости, формоустойчивости и т.д.

Таким образом, представленные в действующих ГОСТ для АСП требования к технологическим характеристикам смесей, свойствам затвердевшего бетона и методам их контроля являются неполными и не соответствуют мировой практике. В них также отсутствует регламентация норм и методов проектирования составов смесей для экструзионной безопалубочной строительной 3D-печати.

По итогам проведенного анализа, можно сделать вывод об отсутствии нормированных или устоявшихся методов и подходов к проектированию составов бетонов, которые адаптированы по технологическим свойствам к строительным аддитивным технологиям (3D-печати).

1.3 Анализ научных подходов проектирования составов бетонов для строительной 3D-печати

Вопросы создания, исследования и применения составов бетонов для строительной 3D-печати рассматриваются в работах отечественных ученых Адамцевича А. О. [44-46], Иноземцева А. С. [47, 48], Королева Е. В. [47-50],

Мухаметрахимова Р. Х. [51, 52], Недосеко И. В. [52-54], Пустовгара А. П. [2, 44-46], Пухаренко Ю. В. [55], Полуэктовой В. А. [56-59]. Среди зарубежных исследователей, занимающихся данным вопросом, можно отметить Mechtcherine V. [39, 60, 61], Mohan M. K. [62, 63], Panda B. [64], Perrot A. [40, 65, 66], Rehman A. U. [41], Russel N. [37-42], Wolfs R. [11], Zhang C. [60, 67, 68]. В настоящее время разработаны и успешно апробированы десятки составов смесей для 3D-печати, которые обладают необходимыми для печати технологическими характеристиками (перекачиваемость, экструдированность, формоустойчивость, работоспособность, сохранность свойств).

Возможность достижения требуемых технологических характеристик обеспечивается характером реологического поведения смеси, которое достаточно хорошо изучено [65]. Для применяемых в строительной 3D-печати составов бетонов характерна многокомпонентность, в них одновременно используются пластифицирующие и модифицирующие добавки, влияющие на их вязкость и структурообразование, а также применяются различные наполнители и заполнители, отличающиеся по гранулометрическому составу и размеру частиц.

Влияние вяжущего компонента, пластифицирующих и модифицирующих добавок на технологические характеристики смеси путем регулирования характера реологического поведения установлены в работах [41, 69, 70]. Введение пластифицирующих добавок и электролитов главным образом влияет на способность смеси к перекачиванию путем регулирования ее пластичности, а модификаторы вязкости влияют на способность смеси сохранять форму после экструзии. Аналогичные результаты получены и в ряде других исследований [47-48, 51, 61, 71, 72], в том числе исследованиях, выполненных авторским коллективом, занимающимся развитием строительной 3D-печати под руководством доктора технических наук Славчевой Г. С. [73-80].

Наравне с рассмотренными ранее факторами, можно выделить также концентрацию и гранулометрический состав применяемых заполнителей и наполнителей.

Систематизация и анализ данных о смесях, применяемых в технологии строительной 3D-печати, позволили выявить виды наполнителей и заполнителей, которые можно разделить на четыре размерные группы:

- крупные заполнители – щебень из горных пород, отходы горных предприятий по переработке руд;
- мелкие заполнители – различные виды песка, дробленые отходы горных пород, известняк, продукты переработки стекла и т.д.;
- микронаполнители – золы-уноса, отходы горнодобывающих производств, микрокремнезем, молотые шлаки;
- нанодисперсные наполнители – микрокремнезем, каолин, мел, наноглина.

Плотность упаковки частиц смеси сама по себе является важным параметром при проектировании бетонных смесей. Данный показатель помогает определить пригодность заполнителей и наполнителей для использования в бетонных смесях. Фактически, частицы должны способствовать более высокой плотности упаковки и оптимизации расхода цементной матрицы.

При этом влияние на показатели пластичности и формоустойчивости смесей зависит от размерного масштаба применяемых наполнителей и заполнителей.

Влияние крупного заполнителя (размер 5-10 мм) [68, 81-85]. Одним из ограничений применения 3D-печати в строительстве является использование крупных заполнителей в смесях. Применение заполнителей с размером частиц более 5 мм обусловлено разрешением печати и производительностью некоторых существующих строительных принтеров. В работе [68] смесь рассматривали как двухфазную: раствор и крупный заполнитель. В этой двухфазной модели раствор был смазочным слоем, покрывающим частицы крупного заполнителя. При этом толщина слоя уменьшалась с увеличением количества заполнителя. В состав раствора входит: цемент, оксид кремния, вода и модифицирующие добавки, в качестве мелкого заполнителя выступает речной песок с максимальным размером частиц 4,75 мм и крупный заполнитель – гравий 5-10 мм. Увеличение объема крупного заполнителя приводит к снижению толщины прослойки раствора между частицами, что приводит к снижению перекачиваемости и экструдированности смеси.

Также влияние крупного заполнителя с размером частиц 5-10 мм исследовалось в работе [81]. Увеличение крупного заполнителя по массе в процентном соотношении всех заполнителей от 50 % до 80 % привело к значительному снижению толщины прослойки цементной матрицы с 4,43 мм до 2,42 мм, что закономерно повлияло на ухудшение текучести раствора.

В работе [82] оценку качества разрабатываемой модели проектирования для оптимизации параметров строительных 3D-принтеров проводили на основе оптимизированной смеси: портландцемент, зола уноса, кремнезем, заполнитель с максимальным размером частиц 5 мм, вода и суперпластификатор. Соотношение цементной матрицы к заполнителю по массе 1 : 1,06 (цементной матрицы 1096,55 кг, заполнителя 1167 кг). Соотношение воды к связующему 0,45.

В серии работ, поддерживаемых Китайским национальным фондом естественных наук [83, 84], комплексно рассматривают вопросы принтера и материала, при этом применяются смеси схожие с обычным бетоном по своему качественному составу: цемент, зола уноса, микрокремнезем, гидроксипропилметилцеллюлоза (HPMC), суперпластификатор, глюконат натрия, замедлители схватывания, вода, наполнитель – речной песок с крупностью 0,15-4,75 мм, заполнитель – гравий 5-10 мм. Соотношение цементной матрицы к заполнителю по массе 1:1,837. Соотношение воды к связующему 0,36.

При исследовании комбинированного заполнителя, состоящего из трех видов отходов промышленности с размерами частиц в пределах 0-9,5 мм [85], также было установлено положительное влияние заполнителя непрерывного фракционного состава на сцепление между слоями.

Влияние мелкого заполнителя (размер 0,1-5 мм) [62, 63, 67, 68, 86-105]. Увеличение концентрации данных заполнителей значительно снижает способность смеси к перекачиванию и экструзии.

Рассмотрим некоторые работы, посвященные проектированию, исследованию и применению составов мелкозернистых цементных смесей. В работе [86] исследовалось влияние различных добавок на подвижность и формоустойчивость смесей для строительной 3D-печати. Пропорции сухих компонентов смеси были

оптимизированы методом упаковки частиц для разработки классических бетонных смесей с минимальным содержанием цемента, при этом плотность упаковки частиц сухих компонентов составляет 0,886-0,898. Во всех исследуемых смесях в качестве заполнителя применяли комбинацию из мелкого и микро-заполнителей, два вида кварцевого песка и кварцевый порошок. Диаметр зерна песка 1 – 0,06-2 мм, песка 2 – 0,1-2 мм, кварцевого порошка – 0,001-0,06 мм. При этом, соотношение цементной матрицы к заполнителям по массе 1 : 1,137 (цементной матрицы 1094,73 кг/м³, составного заполнителя 1244,8 кг/м³). Соотношение воды к связующему 0,32.

Заполнитель является основой прочности бетона, а его содержание имеет решающее значение в технологических свойствах смеси. Чжан и др. [67, 68] обнаружили, что концентрация заполнителя в цементной матрице является важным параметром при проектировании состава смеси. На реологические свойства свежих смесей также оказывает влияние и морфология частиц заполнителя с точки зрения плотности упаковки [87].

Влияние характеристик заполнителя на поведение печатного бетона исследовано в работе [88]. Ученые оценили влияние повышенного содержания заполнителя на реологию высокотиксотропной бетонной смеси. Соотношение песок-связующее варьировалось как 0,6, 0,8, 1,0, 1,2 и 1,5. Пластическая вязкость и предел текучести увеличились на 16,4 % и 129,8 % при увеличении соотношения песок-связующее с 0,6 до 1,2, но это снизило тиксотропию на 18 %. Мохан и др. [89] установили, что увеличение соотношения песка и связующего с 1,0 до 1,4 увеличивает предел текучести с 0,67 до 0,82 кПа и вязкость с 17,1 до 43,1 Па·с.

В работе [62] исследованы реологические свойства цементных смесей с различным соотношением вяжущего и заполнителя с размером частиц не более 2 мм. Отношение заполнителя к вяжущему принимали в диапазоне от 1,0 до 1,8. Было установлено, что увеличение концентрации заполнителя приводит к значительному увеличению предела текучести и вязкости смеси, практически в 5 раз. А также, было установлено, что общая вязкость смеси зависит не только от концентрации заполнителя, но и свойств цементной матрицы. Для определения степени влияния цементной матрицы на реологическое поведение были исследованы смеси

с различным составом вяжущего, при этом соотношение воды и вяжущего было неизменным и составляло 0,35, а цементной матрицы к заполнителю – 1 : 1,134 [63].

В процессе оптимизации свойств бетонов для строительных аддитивных технологий были получены различные смеси, в которых в качестве комплексного заполнителя применяют пески различной фракции. В работе [90] использованы три песка с модулями крупности 1,9, 4,9, 5,8. Соотношение цементной матрицы к заполнителю по массе 1,310 : 1, соотношение воды к связующему 0,31.

Смеси с заполнителем из природного песка с максимальным размером частиц 2 мм одни из самых широко применяемых в практике строительной печати. Для 3D-печати балок в работе [91] применяли раствор, состоящий из 51,1% сухого песка с размерами зерна 0-2 мм, 34,7% портландцемента СЕМ I 52.5 R, 13,2% воды и 1,0% водоудерживающего агента (проценты указаны по массе). Соотношение цементной матрицы к заполнителю по массе 1 : 1,045, соотношение воды к связующему 0,38.

Еще одна смесь, в которой заполнитель состоит из трех видов силикатного песка, применялась в работе [92]. Заполнитель состоит из мелкого, среднего и крупного песка со средним размером частиц 0,17, 0,50, 0,86 мм, соответственно. Соотношение цементной матрицы к заполнителю по массе 1 : 1,602, соотношение воды к связующему 0,28.

Изучение влияния процесса послойного изготовления на проникновение хлоридов было выполнено на образцах, изготовленных из смеси портландцемента (СЕМ I 52,5 N) в сочетании со стандартным песком ($D_{\max} = 2$ мм), водой (В/Ц = 0,35) и суперпластификатором на основе поликарбоксилатных эфиров (РСЕ), соотношение цементной матрицы к заполнителю по массе 1 : 1,462 [93].

Исследования свойств напечатанного материала проводят на изделиях, полученных путем печати отработанных ранее смесей по их реологическим свойствам. В работе [94] в качестве заполнителя был выбран натуральный песок с размерами зерен менее 3 мм, отношение воды к связующему 0,30, а соотношение цементной матрицы к заполнителям по массе 1 : 1,050. В работе [95] использовали смесь с

заполнителем крупностью 0,1-0,4 см, отношение воды к связующему 0,14, а соотношение цементной матрицы к заполнителям по массе 1,172 : 1.

В ряде работ рассматривают возможность применения переработанных продуктов производства в качестве заполнителя. Например, в работе [96] для приготовления раствора в качестве заполнителя в первом случае использовали речной песок, во втором – смесь речного и переработанного песка в соотношении 3 : 1, максимальный размер частиц заполнителя 0,90 мм, портландцемент 42,5, гидроксипропилметилцеллюлоза (НРМС), высокоэффективный суперпластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров, наноглина. Переработанный песок, используемый в этом исследовании, был получен путем дробления и просеивания отходов бетона. Прочность на сжатие основного образца исходного бетона находилась в диапазоне 20-25 МПа. В исследуемых смесях выдерживались соотношения песка/цемента 1,00, воды/цемента 0,35 в эталонном составе, и 0,385 в составе с переработанным песком ввиду его повышенного водопотребления, при этом соотношение цементной матрицы к заполнителю 1,357-1,391 : 1. Добавление переработанного бетона в качестве заполнителя приводит к увеличению жесткости сырого раствора, а следовательно, повышает формоустойчивость свежееотпечатанного слоя. В продолжении исследований в работе [97] рассматривалась возможность полной замены речного песка на переработанный, при этом соотношение цемента/песка оставалось неизменным 1,00, водоцементное отношение увеличено до 0,485, соотношение цементной матрицы к заполнителю по массе 1,489 : 1. Возможность печати составами с таким же заполнителем исследовали в работе [98]. На основании данных исследований можно сделать вывод о том, что применение заполнителей, полученных путем переработки отходов бетона, приводит к необходимости доработки рецептуры цементной матрицы путем увеличения водоцементного отношения и введения дополнительных модифицирующих добавок.

При исследовании нетрадиционных заполнителей, полученных путем переработки отходов, отдельное внимание следует обратить на упаковку частиц. В работе [99] в качестве исследуемых систем были приняты смеси с заполнителем из речного песка, имеющего практически сферическую форму, соотношение сторон

1,19, и с заполнителем из искусственного песка, с соотношением сторон 1,57. Увеличение доли искусственного песка в заполнителе с 0 % до 100 % привело к снижению плотности упаковки частиц с 0,59 до 0,52 и снижению подвижности смеси за счет увеличения предела текучести.

Еще одним широко исследуемым заполнителем, влияющим на прочностные свойства материала, является переработанное стекло различных фракций. В работе [100] в качестве заполнителей использовали речной песок, средний размер зерна 0,206 мм, переработанное стекло с размерами частиц 0,367 мм и 0,796 мм. В качестве комплексного вяжущего использовали смесь цемента, молотого шлака и микрокремнезема. Во всех рассматриваемых смесях, вне зависимости от вида и состава заполнителя, отношение вяжущего к заполнителю составляет 1 : 1, вяжущего к воде 0,237, с учетом модификаторов вязкости и суперпластификаторов соотношение цементной матрицы к заполнителю по массе 1,263 : 1. Введение в составы переработанного стекла привело к снижению прочности на изгиб напечатанных образцов, испытанных вдоль печати слоя. При этом прочность на изгиб перпендикулярно направлению печати, наоборот, увеличилась, а введение более крупных агрегатов привело к увеличению пористости материала.

В отечественных разработках [101-105], защищенных охранными документами, при использовании в качестве заполнителя кварцевого песка с размерами частиц 0,16-1,25 мм массовые соотношения заполнителя к сухим компонентам цементной матрицы находятся в узком диапазоне 0,7-1,3.

На основании проведенного анализа можно однозначно установить ограничения применения мелких заполнителей в смесях, адаптированных по своим свойствам к технологии экструзионной безопалубочной печати:

- размер зерен не должен превышать 5 мм, что позволяет его классифицировать как мелкий, а получаемую растворную смесь, по аналогии с классическими бетонными смесями, рассматривать как мелкозернистую;
- массовое соотношение связующего к мелкому заполнителю должно быть не более 2.

Влияние микронаполнителей (5-100 мкм) [76, 106-112]. Применение наполнителей данной размерности, сопоставимой с размерами частиц вяжущего компонента, определяется задачей снижения расхода цемента. Установлено, что концентрация микронаполнителей в модифицированных составах смесей находится в диапазоне 20-100 % от массы цемента. При этом от вида применяемого наполнителя зависит изменение характера реологического поведения смеси и, соответственно, ее технологические характеристики. Например, введение зол-уноса приводит к снижению пластичности смеси за счет увеличения значения предела текучести и пластической вязкости смесей [106, 107]. Повысить пластичность смеси можно путем введения в состав смеси известняковой муки [76] или молотого шлака, что приводит к увеличению подвижности [108], а наноглина улучшает формоустойчивость экструдированных элементов [109]. Для достижения оптимальных значений технологических характеристик смесей для 3D-печати необходимо обеспечить рациональное распределение указанных видов наполнителей по размерам частиц в их составе.

В ряде работ рассматривается одновременное применение в составах смесей мелких заполнителей и микронаполнителей для снижения расхода цемента при сохранении технологических показателей качества смесей [110-112].

Влияние нанодисперсных наполнителей (менее 50 нм) [62, 113-116].

В силу размера частиц нанодисперсные наполнители можно отнести к модифицирующим добавкам, концентрация которых в смесях не превышает 5 % от массы цемента. Особенностью данных наполнителей является способность повысить способность смеси к сохранению своей формы путем увеличения значений показателей формоустойчивости без изменения ее пластичности за счет рационального размещения частиц и уплотнения структуры смеси.

На основании проведенного обзора можно заключить, что на технологические характеристики смеси главным образом влияют масштабный фактор применяемых заполнителей и наполнителей, их гранулометрический состав и концентрация в составе смесей.

Стоит отметить, что важную роль играет распределение заполнителя по фракциям. Доказано, что неоднородность песка в составе смесей для 3D-печати обеспечивает повышение их работоспособности [117]. В ранее проведенных исследованиях [75, 76], также установлено, что применение полидисперсных наполнителей и заполнителей в размерном диапазоне от нано- до мелкодисперсных обеспечивает получение требуемых показателей пластичности и формоустойчивости смесей.

Эффективность и технологичность строительной 3D-печати зависят от возможности регулирования характеристик смесей на всех стадиях процесса [61, 69, 118]. Оптимизация составов смесей базируется на решении двух основных проблем:

- 1) обеспечения необходимых для безопалубочной печати технологических характеристик смесей – текучести для их перекачивания, пластичности для экструзии, сохранности формы слоя после его укладки, структурной прочности для восприятия нагрузки укладываемых выше слоев;

- 2) синхронизации скорости схватывания и твердения смесей со скоростью печати строительного объекта.

В результате проектирования и апробации достаточно большой номенклатуры смесей наиболее эффективными и широко используемыми признаны микро- и мелкозернистые составы на основе портландцемента. Составы на других видах связующего менее универсальны и поэтому находят ограниченное применение.

Таким образом, приоритет в решении проблемы обеспечения особых технологических свойств смесей для строительной 3D-печати соотносится с выбором мелких заполнителей и регулированием их концентрации в составе смесей. При этом общепризнанным считается, что для обеспечения работоспособности смесей массовое соотношение связующее/мелкий заполнитель должно быть не более 2, размер зерен заполнителей не должен превышать 5 мм. Одновременно приоритет отдается применению полидисперсных наполнителей с непрерывной гранулометрией [117] в составе смесей для 3D-печати.

На основании произведенного анализа можно однозначно сделать вывод о том, что при выборе заполнителей и регулировании их концентрации в составе проектируемой смеси преобладает эмпирический подход, отсутствуют общие требования, предъявляемые к заполнителям, обеспечивающим создание технологичных смесей для строительной 3D-печати. Как правило, в работах не обоснован выбор заполнителя с позиции его влияния на технологические характеристики и реологические свойства смеси. Как следствие, отсутствует понимание механизма влияния заполнителей на совокупность реологических свойств 3D-печатных смесей, однозначно не определено влияние заполнителя на технологические характеристики смеси, обеспечивающие бездефектную печать.

Таким образом, разработка состава смеси в каждом конкретном случае производится опытным путем, для чего требуется реализация достаточно обширной и трудоемкой серии экспериментов. При этом, полученные частные результаты трудно или вообще нельзя применить к другим видам сырья, технологическим условиям и оборудованию для 3D-печати.

На основании проведенного аналитического обзора сформулирована *проблема исследования*, заключающаяся в том, что отсутствуют общепризнанные универсальные методы и подходы, в том числе нормированные, которые позволили бы вне зависимости от параметров оборудования и с учетом конкретных свойств сырья целенаправленно проектировать составы бетонов с особыми технологическими свойствами, обеспечивающие их применимость к условиям экструзионной безопалубочной строительной 3D-печати.

1.4 Разработка концепции научных исследований

Объект исследования – мелкозернистые цементные бетоны для строительной 3D-печати.

Предмет исследования – закономерности взаимосвязи состава, структуры и реологических свойств готовых к употреблению смесей как основа проектирования составов бетонов для строительной 3D-печати.

Для решения проблемы проектирования составов смесей, адаптированных по технологическим свойствам к процессу строительной 3D-печати, выдвинута следующая научная *гипотеза*. Предполагается, что исследование реологического поведения, специальных технологических свойств готовых к употреблению смесей для строительной 3D-печати позволит установить их количественную взаимосвязь с параметрами состава и структуры. Это позволит определить набор значений параметров состава и структуры, диапазон значений реологических и технологических свойств, критериальных для обеспечения пригодности смесей к печати. На этой основе предполагается разработать научно-обоснованные методику и алгоритм проектирования составов бетонов, адекватность и применимость которых будет доказана промышленными испытаниями.

Рассмотрение структуры вязко-пластичной мелкозернистой смеси основывается на следующем допущении. Структура смеси как гетерогенной дисперсной системы рассматривается на двух масштабных уровнях – мезо- и микро- (рисунок 1.1).

На мезоуровне рассматривается двухкомпонентная система «цементная матрица + мелкий заполнитель», где в качестве дисперсной фазы принимаются частицы мелкого заполнителя, а в качестве вязко-пластичной среды – цементная матрица, которая на данном масштабном уровне представляется как условно-однородная среда. Данная среда с точки зрения реологического поведения квалифицируется как неньютоновская вязко-пластичная жидкость, которая при малых нагрузках ведет себя как псевдотвердое тело, а при достижении внешних усилий, превышающих предел текучести, проявляет свойства жидкости.

На микроуровне структура цементной матрицы рассматривается как классическая гетерогенная дисперсная система «дисперсная фаза (частицы цемента и наполнителей) + дисперсионная среда (водно-ионный раствор)».

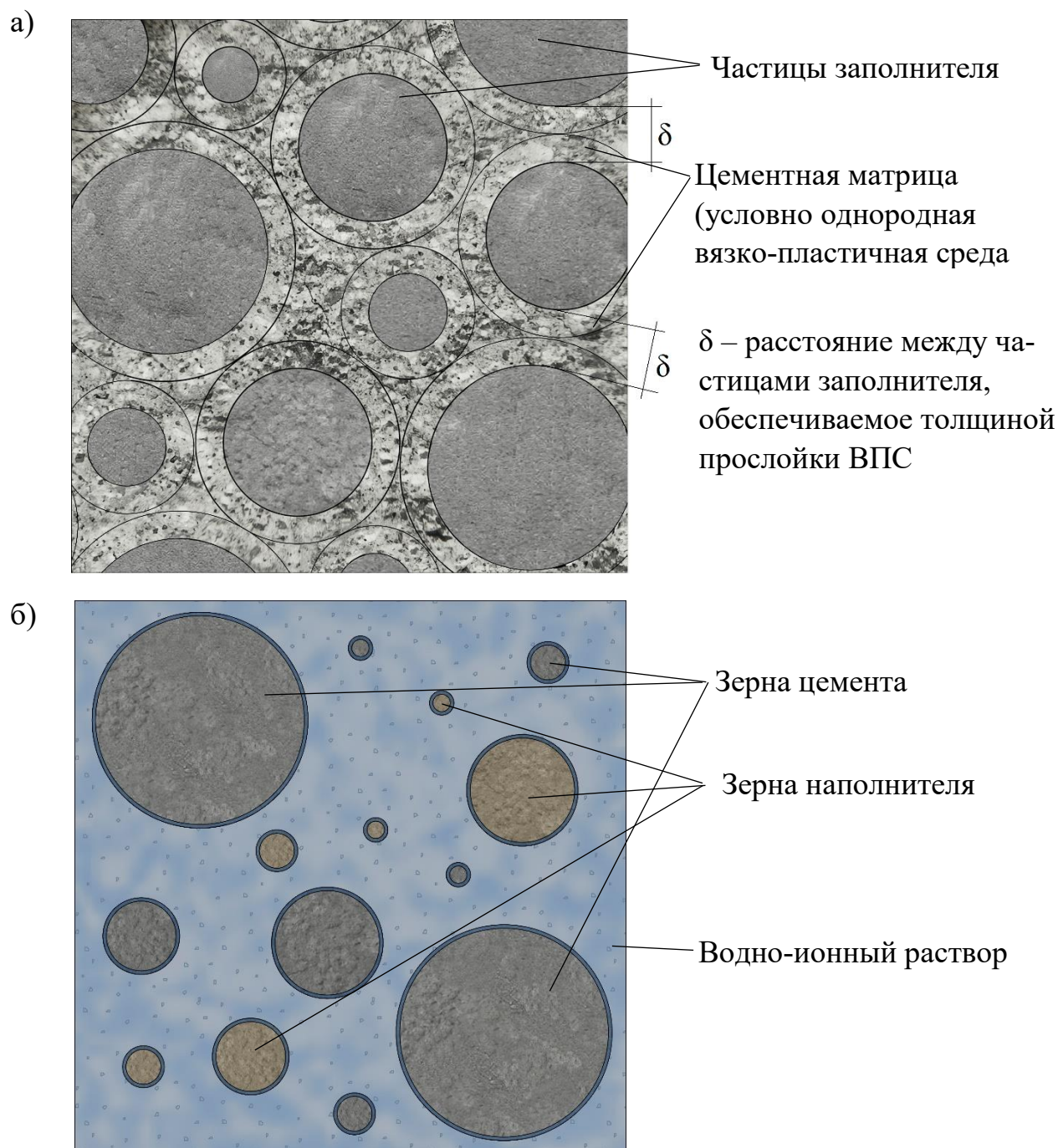


Рисунок 1.1 – Модель структуры смеси а) на мезоуровне; б) на микроуровне.

Согласно положениям фундаментальной структурной реологии и физико-химической механики дисперсных систем [119-121], свойства таких систем меняются от свойств, присущих ньютоновским жидкостям, до свойств, характерных для псевдотвердых тел. В трудах П. А. Ребиндера [119] впервые получена полная реологическая кривая течения дисперсных систем (рисунок 1.2), которая интерпретирована с позиций состояния структуры дисперсной системы.

Полная реологическая кривая дисперсных систем (П.А. Ребиндер)

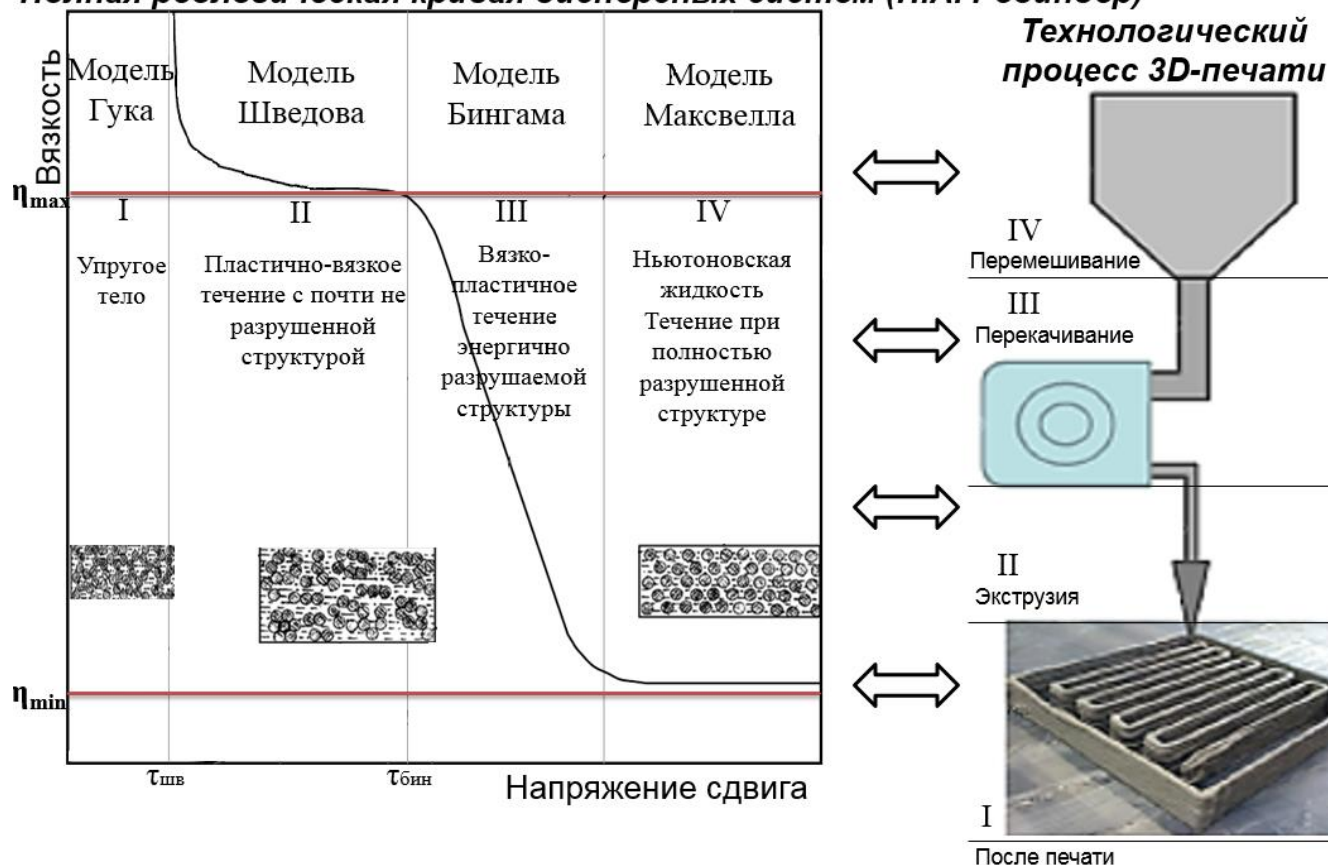


Рисунок 1.2 – Соотношение технологического процесса 3D-печати с полной реологической кривой дисперсных систем

Для реализации технологического процесса 3D-печати смесь должна сохранять прочность и агрегативную устойчивость на всех его стадиях (см. рис. 1.2), при этом в зависимости от величины и скорости приложенных напряжений модели реологического поведения смесей можно соотнести с классической реологической кривой следующим образом (опубликовано [122]):

- при перекачивании смеси – в динамических условиях вязко-пластического течения при действии высоких напряжений сдвига. Переход от ламинарного течения дисперсной системы с разрушенной структурой (IV участок реологической кривой, модель Максвелла) при соответствующем τ_m – минимальное напряжение сдвига, отвечающее полностью разрушенной структуре, к вязко-пластическому течению дисперсной системы с энергично разрушаемой структурой (III участок, модель Бингама);

- при попадании в экструдер смесь переходит в твердообразное состояние за счет восстановления коагуляционных контактов в покое. В процессе экструзии – в динамических условиях вязкопластического течения при действии низких сжимающих и (или) сдвиговых напряжений (начало III участка, переход к II, модель Шведова);

- на стадии послойной печати – опять происходит переход смеси в твердообразное состояние с восстановлением коагуляционной структуры, соответствующее участку I реологической кривой (модель Гука). Далее в процессе печати каждый слой находится в статических условиях при действии сжимающих напряжений (смесь как упругое тело, не разрушаемое под весом вышележащих слоев).

На основании соответствия состояния смеси на всех этапах печати с участками полной реологической кривой можно выделить принципиальное отличие технологического цикла строительной 3D-печати от классической литьевой технологии, которое заключается в обратном движении свойств структурированных дисперсных систем по реологической кривой: от состояния текучести до состояния псевдотвердого тела с минимальными деформациями.

Устойчивость структуры смеси, определяющая ее пригодность к условиям 3D-печати, определяется балансом сил. Внешние воздействия на различных этапах технологического процесса печати должны быть компенсированы внутренними силами взаимодействия в структуре смеси.

Для оценки устойчивости классических дисперсных систем используют два критерия – агрегируемости и прочности, теоретически обоснованные в работах [119, 123, 124]. Прочность структуры дисперсной системы зависит от размера частиц (в области $< r_i$), прочности индивидуальных контактов и их числа в единице объема структуры, зависящего от концентрации дисперсной фазы φ в дисперсионной среде:

$$P_m = \alpha_i F_c n^{2/3} = \alpha_i F_c f(\varphi) / \bar{d}^2, \quad (1.1)$$

где P_m – прочность структуры, α_i – коэффициент, характеризующий тип упаковки частиц, F_c – сила сцепления в контакте, n – число контактов между частицами в единице объема, φ – объемная концентрация частиц, $\bar{d}$ – средний размер частиц.

Критерий агрегируемости, согласно соотношению (1.2), определяет возможность самопроизвольного образования контактов между частицами и устойчивость возникающих структур в поле силы тяжести:

$$\frac{d_c}{2} = r_c \equiv \left[(U_i/r) / \left(\frac{4}{3} \pi \rho_{eff} g h_i \right) \right]^{1/2}, \quad (1.2)$$

где U_i – энергия взаимодействия частиц в контакте, h_i – расстояние между частицами, ρ_{eff} – приведенная плотность частицы в дисперсионной среде, g – ускорение силы тяжести.

На основании данных классических параметров для мелкозернистой цементной смеси на мезоуровне ее структуры «заполнитель – цементная матрица» (см. рис. 1.1 а) параметры, определяющие устойчивость системы, видоизменяются, а внутренние силы, играющие ключевую роль на микроуровне, становятся пренебрежимо малы из-за больших расстояний между частицами заполнителя. Частицы заполнителя взаимодействуют через прослойки условно однородной цементной матрицы, обеспечивающие пластичность смеси.

Согласно принятой модели и допущению, что на мезоуровне цементная матрица рассматривается как условно-однородная среда, предложены структурные параметры и рецептурно-технологические факторы регулирования агрегативной устойчивости и реологического поведения вязкопластичных цементных смесей (таблица 1.4).

По аналогии с классическими критериями прочности и устойчивости дисперсных систем (см. соотношения 1.1 и 1.2) в качестве критериального структурного параметра, предложен параметр *толщины прослойки* вязко-пластичной цементной матрицы $\delta_{цм}$ между частицами заполнителя.

Таблица 1.4 – Структурные составляющие и рецептурно-технологические факторы управления реологическими свойствами в подсистемах «жидкость – твердая фаза» на различных масштабных уровнях

Масштабный уровень структуры	Анализируемая система	Включения		Матрица		Структурные параметры	Рецептурно-технологические факторы
		Компоненты	Размер, м	Вещественный состав	Реологический тип		
МЕЗОУРОВЕНЬ	Мелкозернистый цементный раствор (грубодисперсная система)	Зерна заполнителя	$10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$	Микрозернистая цементная паста	Неньютоновская жидкость	- расстояние между частицами - толщина прослойки вязко-пластичной цементной матрицы $\delta_{цм}$ - объемное соотношение заполнителя и цементной матрицы ($V_z/V_{цм}$) - морфология, средний размер (d_z) и распределение по размерам частиц заполнителя - плотность упаковки частиц заполнителя	- массовые отношения заполнителя и цемента - фракционный состав (гранулометрия) заполнителя
МИКРОУРОВЕНЬ	Микрозернистое цементное тесто (микродисперсная система)	Зерна цемента, зерна микрозаполнителя	$10^{-6} - 10^{-4}$	Водно-ионный раствор	Ньютоновская жидкость	- концентрация дисперсной фазы в дисперсионной среде - межфазная поверхность - тип упаковки частиц (α_i) - сила сцепления в контакте (F_c) - число контактов между частицами (n) - объемная концентрация частиц (φ) - средний размер частиц (d) - энергия взаимодействия частиц (U_i) - расстояние между частицами (h_i)	- водоцементное отношение (водо-твердое отношение) - гранулометрический состав частиц цемента и микрозаполнителя - химико-минералогический состав цемента - виды и дозировки добавок электролитов - вид и концентрация модификаторов вязкости и ПАВ

Значения толщины прослойки цементной матрицы должны обеспечивать:

- течение смеси без нарушения сплошности структуры в динамических условиях перекачивания и экструзии (без эффекта «заклинивания» частиц заполнителя в потоке смеси);
- агрегативную устойчивость (формоустойчивость) смеси в статических условиях, в процессе послойной укладки слоев.

Толщина прослойки в свою очередь определяется следующими структурными параметрами:

- объемным соотношением заполнителя и цементной матрицы ($V_z/V_{цм}$);
- морфологией, средним размером (d_3) и распределением по размерам частиц заполнителя;
- плотностью упаковки частиц заполнителя.

При этом данные параметры являются взаимосвязанными, а гранулометрический состав заполнителя должен обеспечивать плотную упаковку частиц для агрегативной устойчивости печатного слоя после экструзии смеси.

На основании предложенных модельных представлений и на основании анализа научной информации о составах мелкозернистых бетонов для 3D-печати предлагается ввести следующие ограничения по диапазону значений *толщины прослойки* вязко-пластичной цементной матрицы $\delta_{цм}$:

1) $\delta_{цм} \leq d_3 \leq 5$ мм, так как при увеличении толщины прослойки цементной матрицы, свойства смеси будут определяться только свойствами самой цементной матрицы. При этом диаметр части заполнителя находится в диапазоне от 0,1 до 5 мм. Нижнее ограничение предполагается установить в процессе исследований, так как именно от его величины будет зависеть технологичность смеси;

2) размер частиц дисперсной фазы на микроуровне должен быть меньше толщины прослойки $d_{\text{микрочастиц}} < \delta_{цм}$, что соответствует принятому допущению об условной однородности цементной матрицы и обеспечивает взаимное движение частиц заполнителя в процессе перекачивания и экструзии.

Регулирование предложенных структурных параметров обеспечивается варьированием следующих рецептурно-технологических факторов:

- 1) вид и фракционный состав (гранулометрия) частиц заполнителя;
- 2) массовое соотношение заполнителя и цемента.

Структурные параметры и рецептурно-технологические факторы применительно к микроуровню структуры являются хорошо изученными, их набор и ограничения по значениям определены на основании ранее проведенных исследований авторского коллектива [75-77], что и будет использовано при реализации исследований в данной работе.

Для разработки метода проектирования составов бетонов предполагается обосновать требования к диапазону значений реологических характеристик смеси, обеспечивающих их пригодность к перекачке, экструзии и послойной укладке. Также получить достоверные экспериментально-статистические зависимости:

- реологические характеристики смеси – толщина прослойки цементной матрицы как критериального параметра ее структуры;
- параметры состава – толщина прослойки цементной матрицы

Данные зависимости будут использованы как основа разработки метода проектирования составов мелкозернистых бетонов для 3D-печати. На основе предложенного метода предполагается разработать составы бетонов на различных видах заполнителей и апробировать возможность печати изделий на их основе в лабораторных и производственных условиях.

1.5 Цель, задачи и блок-схема исследования

Целью диссертационной работы является разработка научно-обоснованного метода проектирования составов мелкозернистых бетонов для строительной 3D-печати со специальными технологическими свойствами.

В соответствии с теоретическими подходами, поставленной целью и выдвинутой научной гипотезой сформулированы основные задачи экспериментальных исследований и прикладных разработок:

- 1) изучить влияния концентрации и характеристик мелких заполнителей, вида цементной матрицы на реологические характеристики смесей, критериальные для их пригодности к строительной 3D-печати;
- 2) получить экспериментально-статистические зависимости «параметры состава и структуры – реологические характеристики смесей» как основу для проектирования составов бетонов;
- 3) разработать методику, алгоритм и запроектировать составы мелкозернистых бетонов для 3D-печати;
- 4) произвести оценку технологических свойств готовых к употреблению смесей и комплексную качества бетонов для строительной 3D-печати, полученных на основе разработанных составов;
- 5) разработать технологические решения по производству сухих строительных смесей, 3D-печати изделий и произвести их опытно-промышленную апробацию.

Блок-схема исследования представлена на рисунке 1.3.

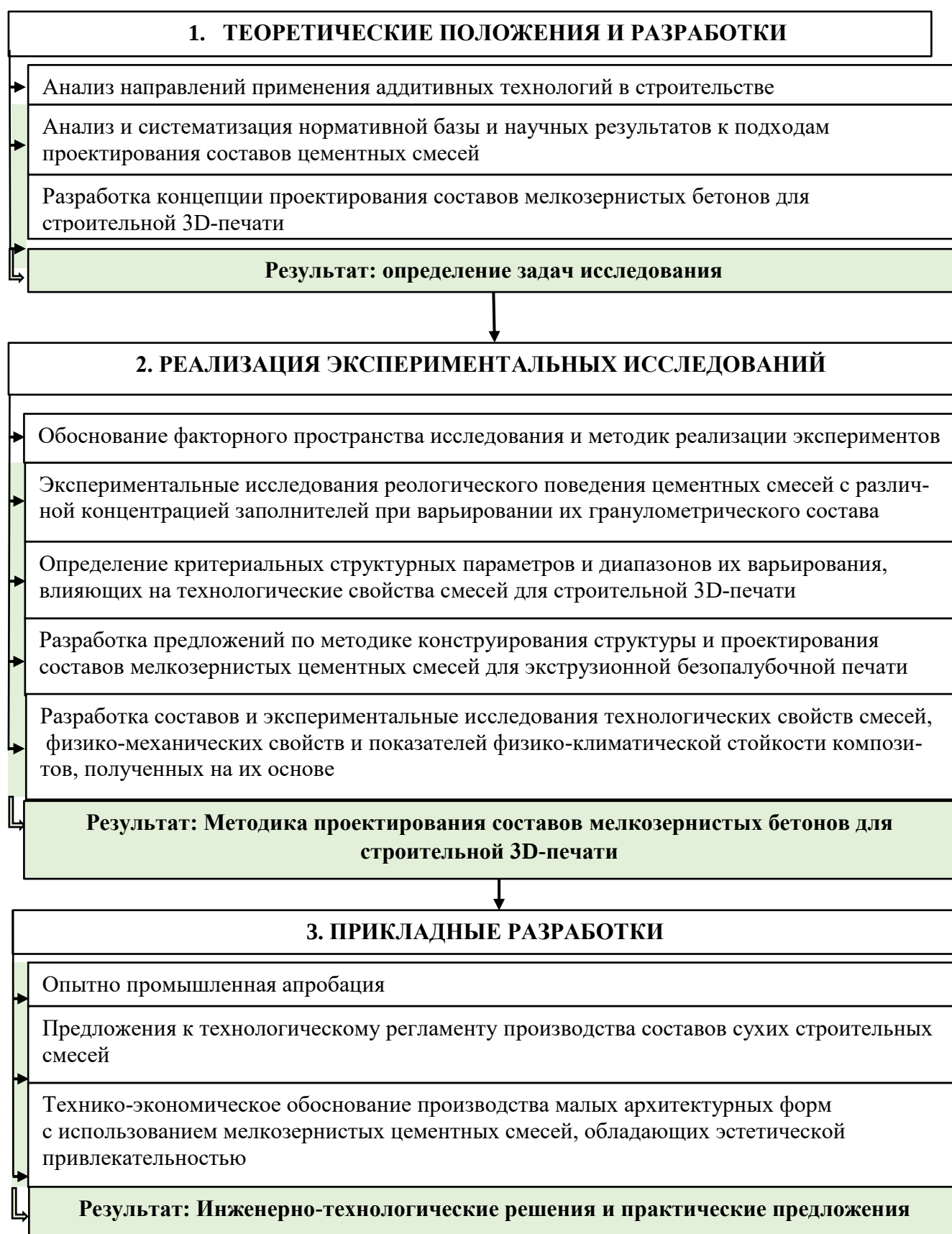


Рисунок 1.3 – Структура диссертационного исследования

1.6 Выводы по главе 1

1. Анализ позиций аддитивных технологий (3D-печати) в строительстве показал, что одной из существенных проблем, сдерживающих расширение их присутствия на строительном рынке, является то, что применяемые материалы создаются под индивидуальный конкретный проект и применяемый технологический комплекс, конкретную сырьевую базу путем опытного подбора. На строительном рынке отсутствует универсальная и доступная потребителю номенклатура смесей различного назначения, пригодная для использования в отличающихся технологических комплексах.

2. Проблема заключается в том, что отсутствуют общепризнанные универсальные методы и подходы, в том числе нормированные, которые позволили бы независимо от параметров оборудования и с учетом конкретных свойств сырья целенаправленно проектировать составы бетонов с особыми технологическими свойствами, обеспечивающими их применимость к условиям экструзионной безопалубочной строительной 3D-печати. В действующих стандартах для аддитивного строительного производства отсутствует регламентация норм и методов проектирования составов бетонов. Нормированные методики проектирования составов тяжелых и мелкозернистых бетонов не могут быть использованы для проектирования составов бетонов для 3D-печати в связи с тем, что в классической методике проектирования составов бетонов критериальными факторами являются их удобоукладываемость и прочность. При безопалубочной печати сама возможность создания строительного объекта определяется свойствами свежеприготовленной смеси. Поэтому при проектировании состава бетонов для 3D-печати критериальными следует считать именно технологические характеристики готовых к употреблению смесей, принципиально отличающиеся от характеристик традиционных бетонных смесей.

3. Целью диссертационной работы является разработка научно-обоснованного метода проектирования составов мелкозернистых бетонов для строительной 3D-печати со специальными технологическими свойствами.

4. Концепция исследования заключается в том, что проектирование составов мелкозернистых цементных бетонов для 3D-печати, отличающихся особыми технологическими свойствами, должно основываться на учете данных свойств. Методика проектирования будет основываться на экспериментально установленных количественных взаимосвязях параметров состава и структуры с реологическим поведением готовых к употреблению смесей как вязко-пластичных систем в динамических условиях экструзии и статических условиях послойной укладки. В качестве главного критериального параметра структуры, обеспечивающего экструдирруемость и формоустойчивость, принята толщина прослойки цементной матрицы между частицами заполнителя.

2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследования – мелкозернистые цементные бетоны для строительной 3D-печати.

Предмет исследования – закономерности взаимосвязи состава, структуры и реологических свойств готовых к употреблению смесей как основа проектирования составов бетонов для строительной 3D-печати.

Экспериментальные исследования включали 3 этапа.

1. Определение исходных граничных требований к характеристикам и концентрации мелких заполнителей и обоснование значений параметров структуры, критериальных для обеспечения технологичности смесей.

2. Получение экспериментально-статистических зависимостей «параметры состава и структуры – реологические характеристики смесей» как основы для проектирования составов бетонов.

3. Проектирование составов мелкозернистых бетонов на различных видах заполнителя и комплексная оценка свойств смесей и композитов на их основе.

В процессе промышленной апробации планируется:

1) провести испытания запроектованных составов при печати смесями на их основе на промышленном 3D-принтере;

2) апробировать возможность изготовления сухих смесей на основе запроектованных составов на типовом оборудовании завода сухих строительных смесей.

2.1 Характеристика сырьевых компонентов

Экспериментальные исследования проводились для мелкозернистых смесей, в которых размер зерен заполнителя изменялся в диапазоне 0,1-5 мм.

В качестве вяжущего применялись два вида цемента: СЕМ I 42,5R – рядовой серый; СЕМ I 52,5R – белый (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Характеристики цемента

Вид цемента	Характеристика состава	Характеристика гранулометрического состава	
		ω частиц, %	d, нм
CEM I 42,5R	Минералогический состав: C ₃ S – 60,85 %, C ₂ S – 13,38 %, C ₃ A – 7,42 %, C ₄ AF – 11,23 %	4,0	1 000
		13,2	5 000
		17,9	10 000
		18,2	16 000
		22,3	26 000
		20,1	44 000
CEM I 52,5R	Минералогический состав: C ₃ S – 66,07 %, C ₂ S – 17,48 %, C ₃ A – 15,42 %, C ₄ AF – 1,03 %	4,2	1 000
		12,0	5 000
		19,1	10 000
		14,2	14 000
		32,4	25 500
		12,5	32 000

В качестве базовых заполнителей, отличающихся по своему гранулометрическому составу, но сопоставимой дисперсности использовались:

- 1) кварцевый песок – полидисперсный заполнитель;
- 2) карбонатный песок – монодисперсный заполнитель.

В качестве цветных заполнителей, придающих композитам визуальный эффект искусственного камня, использовались дробленые горные породы: гранит орех, сланец терракотовый, серпентинит (змеевик).

Характеристики заполнителей представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристики заполнителей

Вид заполнителя	Минералогический состав	Остаток на сите, %	Размер ячейки сита, мм	Истинная плотность, кг/м ³	Насыпная плотность, кг/м ³
Кварцевый песок	SiO ₂ ~ 95 %	13,2	0,63	2650	1621
		49,3	0,315		
		37,5	0,16		
Карбонатный песок	CaCO ₃ ~ 95 %	0,75	1,25	2640	1558
		98,14	0,63		
		0,94	0,315		
		0,17	0,16		

Продолжение таблицы 2.2

Вид заполнителя	Минералогический состав	Остаток на сите, %	Размер ячейки сита, мм	Истинная плотность, кг/м ³	Насыпная плотность, кг/м ³
Гранит орех	SiO ₂ – 68-75 %; K ₂ O – 5-7 %; Na ₂ O – 2-3 %; CaO – 1-3 %; FeO < 4 %	67	2,5	2610	1501
		13	1,25		
		20	0,63		
Сланец терракотовый	SiO ₂ – 15-27 %, Al ₂ O ₃ – 55-75 %, Fe ₂ O ₃ – 0,04-3,6 %, CaO – 0,04-5,6 %, TiO ₂ – ,3-1,02 %, MgO – 0,04-5,6 %	82	2,5	2520	1462
		18	1,25		
Серпентинит (змеевик)	MgO – 43,0 %, SiO ₂ – 44,1 %, H ₂ O – 12,9 %	100	2,5	2640	1544

Для обеспечения необходимых технологических характеристик смесей применялись добавки пластификаторы и модификаторы вязкости.

В качестве пластификатора, влияющего на подвижность смеси, использовался типичный представитель суперпластификаторов на основе поликарбоксилатных эфиров (Sika® ViscoCrete® 20HE), выбор которого обусловлен тем, что пластификаторы на основе поликарбоксилатных эфиров, по результатам выполненных ранее исследований, показали наибольшую эффективность при регулировании свойств смесей для 3D-печати [77].

Выбор модификаторов вязкости также осуществлен на основании результатов предыдущих исследований [73, 74, 79, 80]. В качестве представителей добавок-электролитов, влияющих на свойства дисперсионной среды и кинетику структурообразования, использовались:

1) жидкое стекло (соль – сильный электролит), так как является типичным ускорителем 1 группы процессов гидратации цемента, схватывания и твердения смеси, участвует в обменных реакциях: анионная составляющая взаимодействует с Al-содержащими фазами цементного клинкера с образованием труднорастворимых двойных солей гидратов, а катионная составляющая сохраняется в жидкой

фазе, повышая щелочность среды и ионную силу раствора. При этом ускоряются процессы гидратации цемента, схватывания и твердения смеси;

2) пиррофосфат калия, является типичным ускорителем процессов гидратации цемента 2 группы и хорошим модификатором вязкости дисперсионной среды, повышает плотность системы и её устойчивость, за счет взаимодействия с ионами среды; с другой стороны откладывающиеся на зернах вяжущих продукты взаимодействия в виде пленок разной плотности и проницаемости, сохраняют свои свойства (форму), но под действием внешней нагрузки, пленки способны разрушаться, вода вновь поступает к частицам системы, тем самым она становится пластичной и начинает течь.

В качестве модификаторов вязкости использовались:

1) камедь ксантановая, химически инертна по отношению к минералам цементного клинкера, но является эффективным модификатором вязкости дисперсионной среды, изменяя ее плотность и вязкость, увеличивая структурную прочность системы. С другой стороны, возможно замедление процесса схватывания и твердения, в силу структурирования жидкой фазы, что снижает активность воды, необходимую для гидратации цементной системы;

2) метакеолин, который обладают родственной цементу кристаллохимической структурой. Частицы размещаются между цементными зернами, что может дополнительно уплотнять структуру системы, тем самым создавая плотную пространственную упаковку частиц твердой фазы, что снижает объем пор в системе, способствует увеличению её прочности. Метакеолин также является модификатором вязкости дисперсионной среды. В силу развитой и активной поверхности его частицы способны к формированию полимолекулярных слоев адсорбированной воды на поверхности. Снижение энергии взаимодействия частиц цемента за счет наличия в межзерновом объеме частиц, покрытых толстыми слоями адсорбированной воды, способствует изменению пластичности системы.

Также, для получения эффекта окрашивания были использованы красный пигмент на основе оксида Fe_2O_3 (производства Чехия) – мелкокристаллический порошок и зеленый пигмент (производства Китай) на основе $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Характеристики пигментов

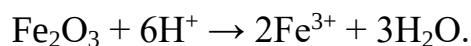
Наименование пигмента	«ТР-303»	Deqing tongchem CO
Наименование характеристики	Значение	
рН	4,30	6,5
Растворимость в воде, %	0,20	1,5
Кроющая способность, %	99,80	99,71
Содержание Fe_2O_3 , %	96,1	26,1
Влажность, %	0,60	0,7
Маслопоглощение	19,2	31,2

Выбор железосодержащих пигментов обусловлен тем, что оксид железа Fe_2O_3 обладает основными свойствами со слабыми признаками амфотерности, не растворим в воде, устойчив к воздействию света, действию щелочей и слабых кислот. Может образовывать гидроксид железа, обладающий амфотерными свойствами:

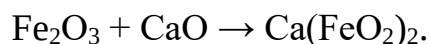


и соответственно, соли двух типов (например, FeCl_3 или KFeO_2).

Для него характерно образование двойных солей – железных. Основные свойства проявляются в способности реагировать с кислотами:



Слабокислотные свойства проявляются следующим образом. В водных растворах щелочей Fe_2O_3 не растворяется, но в жестких условиях с твердыми оксидами, щелочами и карбонатами происходит образование ферритов, например,



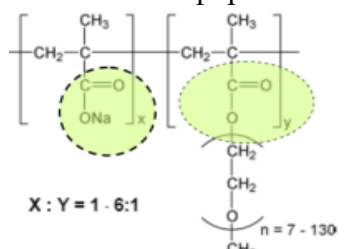
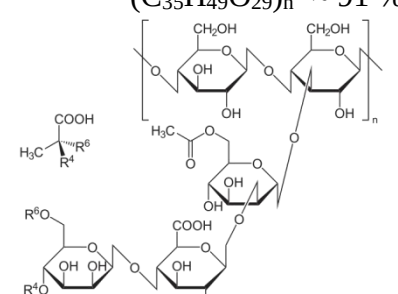
Стоит отметить, что данные взаимодействия являются сложными физико-химическими процессами, т.к. при растворении цементного клинкера в воде наблюдается насыщенный и пересыщенный раствор, включающий различные катионы и

анионы (протекают несколько параллельных, последовательных и сопряженных химических реакций).

Таким образом, железосодержащие пигменты могут проявлять себя, с одной стороны, как кристаллическая затравка, облегчая выделение новой фазы из перенасыщенных растворов. С другой стороны, участвовать в реакциях присоединения или обмена с различными компонентами цементной системы, ускоряя процессы выкристаллизовывания простых и двойных солей-гидратов из пересыщенных растворов. В обоих случаях это приведет к увеличению скоростей твердофазных реакций гидратации и твердения, а также к формированию новообразований с измененной морфологией кристаллогидратов и дополнительному уплотнению цементного камня.

Основные характеристики используемых добавок представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Характеристика добавок

Вид добавки	Характеристика состава	Характеристика гранулометрического состава	
		ω частиц, %	d, нм
Суперпластификатор Sika® ViscoCrete® 20NE	Поликарбоксилатные эфиры  X : Y = 1 - 6:1 n = 7 - 130 100 %	-	-
		41	180 000
Камедь ксантановая FUFENG®80	(C₃₅H₄₉O₂₉)_n ~ 91 % 	35	200 000
		15	250 000

Продолжение таблицы 2.4

Вид добавки	Характеристика состава	Характеристика гранулометрического состава	
		ω частиц, %	d, нм
Метакаолин «ВМК-45» по ТУ 23.99.19-004- 34556001-2017	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ SiO_2 – 53 %, Al_2O_3 – 47 %	2,7	1 000
		20,4	5 000
		16,6	10 000
		9,8	14 000
		25,5	30 000
		15,0	46 000
		10,0	60 000
Жидкое стекло техническое (ГОСТ 13078-81)	SiO_2 – 33,76 %, Na_2O – 10,63 %	31	25
		44	56
		5	78
Тетракалийпиро- фосфат (тех.)	$\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$ – 98 %	38	150
		41	200
		16	250
Пигмент красный (ТР-303)	Fe_2O_3 – 96,1 %	15,0	700
		10,6	1 000
		11,4	2 000
		16,0	5 600
		19,5	12 000
		22,7	26 000
Пигмент зеленый (Deqing tongchem CO)	Fe_2O_3 – 26,1 %	30,0	800
		11,0	1 000
		20,0	1 700
		17,9	5 000
		13,0	10 000
		6,1	12 500

2.2 Этапы эксперимента и факторное пространство исследований

На первом этапе эксперимента исследовали влияние заполнителей различного гранулометрического состава и концентрации на реологическое поведение модельных мелкозернистых смесей (таблица 2.5).

Цель первого этапа – определение исходных граничных требований к характеристикам и концентрации мелких заполнителей и обоснование значений параметров структуры, критериальных для обеспечения пригодности смеси к 3D-печати (пластичности и формоустойчивости).

Таблица 2.5 – Факторное пространство первого этапа эксперимента

Исходные компоненты системы	Портландцемент СЕМ I 42,5R (Ц), Суперпластификатор Sika® ViscoCrete® 20HE (СП), техническая вода (В)	
	Кварцевый песок (П)	Карбонатный песок (К)
Обозначение системы	Ц – П – СП – В/Ц	Ц – К – СП – В/Ц
Варьируемые параметры	1. Гранулометрия заполнителя	
	• Полифракционный заполнитель	• Монофракционный заполнитель
	2. Концентрация заполнителя, задаваемая массовыми соотношениями цемента и заполнителя $m_{\text{цемента}} : m_{\text{заполнителя}}$	
	• $m_{\text{Ц}} : m_{\text{П}} = 1 : 1-2$	• $m_{\text{Ц}} : m_{\text{К}} = 1 : 1-1,75$
Постоянные параметры	Состав цементного теста, СП – 0,8 % от массы цемента Консистенция цементного теста (В/Ц = 0,28-0,31)	
Исследуемые характеристики	Пластичность (способность к экструзии) смеси Формоустойчивость смеси	
Применяемые методы	Методы сдавливающей реометрии (универсальная испытательная система INSTRON 5982)	

Данный этап проводился на модельных системах «цемент + заполнитель + пластифицирующая добавка + вода». Варьирование В/Ц-отношения для данных систем определялись из необходимости получения вязко-пластично дисперсной системы на основе цементного вяжущего (обеспечивалась нормальная густота цементного теста).

В рамках реализации этапа были выполнены следующие исследования:

- исследование пластичности смеси по показателю оценки предела пластичности модельных систем с поли- и монофракционными заполнителями и их различной концентрацией;
- исследование формоустойчивости по показателям структурной, пластической прочностей и относительным пластическим деформациям смесей, подтвердивших свою способность к экструзии;
- расчет структурных параметров модельных систем.

На втором этапе исследований оценивали влияние состава цементной матрицы на реологическое поведение мелкозернистых смесей (таблица 2.6).

Данный этап проводился на модельных системах «цемент + полифракционный заполнитель + пластифицирующая добавка + модифицирующие добавки + вода».

Таблица 2.6 – Факторное пространство второго этапа эксперимента

Исходные компоненты системы	Кварцевый песок (П), суперпластификатор Sika® ViscoCrete®20HE (СП), техническая вода (В)			
	Портландцемент СЕМ I 42,5R (Ц)		Портландцемент СЕМ I 52,5R (Цб)	
	Метакаолин «ВМК-45» (МКЛ)	Тетракалийпирофосфат (тех.) (ТКПФ), камедь ксантановая (КМ)	Метакаолин «ВМК-45» (МКЛ)	Тетракалийпирофосфат (тех.) (ТКПФ), камедь ксантановая (КМ)
Обозначение системы	Ц – П – СП – МКЛ – В/Ц	Ц – П – СП – ТКПФ – КМ – В/Ц	Цб – П – СП – МКЛ – В/Ц	Цб – П – СП – ТКПФ – КМ – В/Ц
Варьируемые параметры	Состав цементного теста			
Постоянные параметры	Вид, гранулометрический состав, дисперсность, средний диаметр частиц, количество заполнителя ($m_{\text{цемента}} : m_{\text{заполнителя}} = 1 : 1,25$) Консистенция цементного теста ($V/C = 0,28-0,32$) Сопоставимые объемные соотношения цементного теста и заполнителя Дозировка пластифицирующих и модифицирующих добавок, в зависимости от их комбинации, принималась постоянной, принятой в процентном отношении от массы цемента (СП – 1 % и МКЛ – 2 %; СП – 1,2 %, ТКПФ – 0,2 % и КМ – 0,2 %)			
Исследуемые характеристики	Пластичность (способность к экструзии) смеси Формоустойчивость смеси			
Применяемые методы	Методы сдавливающей реометрии (универсальная испытательная система INSTRON 5982)			

Исследовано влияние 4 видов цементных матриц, отличающихся видом вяжущего (СЕМ I 42,5R и СЕМ I 52,5R), и модифицирующих добавок, (суперпластификатор + метакаолин и суперпластификатор + тетракалийпирофосфат + камедь ксантановая).

Характеристики и концентрация заполнителей принимались постоянными на основании результатов первого этапа исследований.

Виды и дозировка добавок пластификатора и модификаторов вязкости принимались постоянными, оптимизированными ранее [79, 80] и подтвердившими свою эффективность для запатентованных базовых составов смесей [125-128].

В рамках реализации этапа были выполнены исследования реологических характеристик смесей, аналогичные первому этапу исследований.

На третьем этапе исследований осуществлено проектирование составов мелкозернистых бетонов на различных видах заполнителя и комплексная оценка свойств смесей и композитов на их основе.

Цель третьего этапа – экспериментальная апробация методики и алгоритма проектирования составов бетонов для 3D-печати.

В экспериментах варьировались вид и гранулометрия заполнителей. Исследования проводились на 4 видах заполнителя различного фракционного состава, использованы декоративные заполнители для достижения дополнительного эффекта архитектурной выразительности бетонов. Также использованы два вида пигментов – красный (ПК) и зеленый (ПЗ).

Постоянными принимались вид цемента, дозировки и вид модификаторов вязкости и пластификатора (таблица 2.7). В/Ц-отношение подбирали по условиям обеспечения постоянной консистенции смесей.

В рамках реализации этапа, на основании полученных на предыдущих этапах результатов, был произведен расчет структурных параметров для проектирования составов смесей и подбор массовых соотношений их компонентов. Для запроектированных составов выполнена оценка следующих свойств:

- пластичности запроектированных систем по показателю оценки пластической прочности;
- формоустойчивости по показателям структурной, пластической прочностей и относительным пластическим деформациям запроектированных систем;
- кинетики и сроков схватывания, для определения работоспособности и сохранности свойств.

После получения рациональных по значениям экструдируемости, формоустойчивости, работоспособности и сохранности свойств смесей для бетонов запроектированных составов производился следующий комплекс исследований:

- определение сроков схватывания смеси при 0 °С, + 10 °С и + 30 °С;
- оценка кинетики набора прочности при 0 °С и + 30 °С и в нормальных температурно-влажностных условиях;

- исследование фазового состава и микроструктуры;
- комплексная оценка показателей физико-климатической стойкости.

Таблица 2.7 – Факторное пространство третьего этапа эксперимента

Исходные компоненты системы	Цементная матрица (ЦМ): портландцемент СЕМ I 52,5R (Ц6), суперпластификатор Sika® ViscoCrete® 20NE (СП), камедь ксантановая (КМ), жидкое стекло (ЖС), полипропиленовая фибра (Ф), техническая вода (В)			
	Кварцевый песок (П)	Гранит орех (ГО)	Гранит орех (ГО) + Сланец терракотовый (С) (массовое соотношение 4:1), пигмент красный «ТР-303» (ПК)	Гранит орех (ГО) + Змеевик (З) (массовое соотношение 4:1), пигмент зеленый Deqing tongchem CO (ПЗ)
Обозначение системы	ЦМ – П	ЦМ – ГО	ЦМ – ПК – ГО – С	ЦМ – ПЗ – ГО – З
Варьируемые параметры	Вид заполнителя и размер его частиц, $d_{\text{частиц}} = 0,16-5 \cdot 10^{-3}$ м Отношение толщины прослойки цементной матрицы к среднему размеру частиц заполнителя в диапазоне 0,15-0,21			
Постоянные параметры	Состав и реологические характеристики цементного теста Консистенция цементного теста (В/Ц = 0,32-0,33) Дозировка пластифицирующих и модифицирующих добавок, принятая в процентном отношении от массы цемента (СП – 1,2 %, жидкое стекло – 0,2 % и камедь ксантановая – 0,2 %)			
Исследуемые характеристики	1.1 Пластичность (способность к экструзии) смеси 1.2 Формоустойчивость смеси 2 Кинетика и сроки схватывания смеси			
Применяемые методы	1 Методы сдавливающей реометрии (универсальная испытательная система INSTRON 5982) 2.1 Пенетрометрический метод (карманный пенетрометр Geopocket S068) 2.2 Методика определения сроков схватывания ГОСТ 310.3-76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема»			

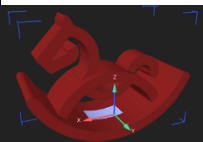
Опытно-промышленная апробация полученных результатов проводились на базе опытно-промышленного участка ФГБОУ ВО «ВГТУ», на промышленном 3D-принтере производства KEYCODE модели «КРАФТЕР-У».

Для апробации были приняты три состава смесей (таблица 2.8).

Все выбранные составы смесей обладают требуемой пластичностью $K_i(I) = 1,7-2,4$ кПа, формоустойчивостью $\sigma_0 = 1,1-2,4$ кПа, $\sigma_{пл} = 35-45$ кПа и относительной деформацией слоя без нарушения его сплошности $\Delta_{пл} = 0,05-0,06$ мм/мм,

что соответствует технологическому параметру пластичности $P_{пл} = 1,7-2,4$ кПа. Также для каждой смеси была принята отдельная архитектурная форма печати.

Таблица 2.8 – Матрица опытно-промышленной апробации полученных результатов

Техническое обозначение смеси / выбранный объект	Исходные компоненты системы	Расход компонентов смеси, кг/м ³						
		З	Цементная матрица					
			Ц	В	СП	КМ	ЖС	ПГ
3D.A.TIЭ.B60 	Портландцемент СЕМ I 52,5R (Ц), заполнитель (З) – кварцевый песок, суперпластификатор Sika® Viscocrete®20HE (СП), камедь ксантановая (КМ), жидкое стекло (ЖС), полипропиленовая фибра, техническая вода (В)	1110	888	284	10,6	1,8	1,8	-
3D.A.TIV.B60 	Портландцемент СЕМ I 52,5R (Ц), заполнитель (З) – гранит орех + сланец терракотовый (4 :1), пигмент красный «ТР-303» (ПГ), суперпластификатор Sika® Viscocrete®20HE, камедь ксантановая (КМ), жидкое стекло (ЖС), полипропиленовая фибра, техническая вода (В)	858 + 215	858	300	10,3	1,7	1,7	1,7
3D.A.TV.B45 	Портландцемент СЕМ I 52,5R (Ц), заполнитель (З) – гранит орех + змеевик (4 :1), пигмент зеленый Deqing tongchem CO (ПГ), суперпластификатор Sika® Viscocrete®20HE (СП), камедь ксантановая (КМ), жидкое стекло (ЖС), полипропиленовая фибра, техническая вода (В)	861 + 215	823	272	10,3	1,7	1,7	1,7

Качество смесей и печатных объектов оценивали по следующим характеристикам:

- пластичность смеси перед началом и в конце печати;

- качество формируемого печатного слоя (отсутствие основных дефектов слоя);
- устойчивость и геометрическое соответствие напечатанных объектов CAD-модели.

2.3 Методика реализации экспериментальных исследований

На основании предложенного факторного пространства экспериментальных исследований были определены современные инструментальные методы, применяемые для оценки свойств цементных смесей, используемые в экструзионной безопалубочной печати, доказавшие свою эффективность [36, 129-135], воспроизводимость эксперимента, необходимую достоверность получаемых результатов и позволяющие дать адекватную оценку технологическим свойствам смесей; а также, методы оценки процессов структурообразования, физико-механических свойств и показателей физико-климатической стойкости цементных композитов.

2.3.1 Методика оценки реологических и технологических свойств смеси

Оценка реологических характеристик производилась специальными методами сдавливающей реометрии (squeeze flow rheometry), признанными эффективными для задач строительной 3D-печати [36, 129-134].

Для оценки пластичности и формоустойчивости смесей в качестве испытуемых образцов (серия из 6 шт) принимаются образцы цилиндры размером $R = h_0 = 25$ мм, изготовленные из вязко-пластичной смеси, не позднее 5 минут от момента затворения сухих компонентов водой. Затем для проведения сдавливающих тестов каждый отдельный образец помещается между двумя гладкими пластинами, диаметр которых соответствует размеру образца, испытания проводились с использованием универсальной испытательной системы INSTRON 5982 с точностью измерений $\pm 0,05$ %.

Определение пластичности смеси, а именно её способности к экструзии при формировании свежего слоя, выполняется с помощью метода сдавливающей реометрии (с постоянной скоростью деформирования 5 мм/с [36, 129]). Скорость сдавливания была принята на основании моделирования внешних воздействий на смесь в процессе прохождения через сопло экструдера.

Полученные в процессе испытаний кривые «нагрузка P – перемещение Δ » интерпретировались в виде кривых зависимости приведенной нагрузки F^* (соотношение 2.1) от относительного изменения высоты образца h/R .

Интерпретация полученных результатов производится на основании построения и анализа кривых зависимости приведенной нагрузки F^* от относительного изменения высоты образца h/R :

$$F_i^* = \frac{Ph_i}{\pi R^2}, \quad (2.1)$$

где $h_i = (h_0 - \Delta)$, h_0 – начальная высота образца, Δ – перемещение в i -тый момент времени, величина R принимается постоянной и равной радиусу образца в начале испытания.

На кривой, в начале деформирования, выделяется зона сохранности устойчивости структуры до достижения точки перегиба, после которой наступает пластическое деформирование системы, в данной точке перегиба рассчитывалась величина K_i (соотношение 2.2), названная N. Roussel'ем оценкой предела пластичности (yield stress value) [36]:

$$K_i\left(\frac{h}{R}\right) = \frac{\sqrt{3}F^*}{2}, \quad (2.2)$$

Определение формоустойчивости смеси, а именно ее способности сохранять геометрические размеры после формирования свежего слоя и его последующего

нагружения вышележащими слоями, по показателям структурной (σ_0) и пластической ($\sigma_{пл}$) прочностей и относительным пластическим деформациям ($\Delta_{пл}$), выполняется с помощью метода сдавливающей реометрии с постоянной скоростью нагружения 0,5 Н/с [130-134]. Скорость нагружения была принята на основании моделирования сформированного слоя в статических условиях, что соответствует средней скорости возрастания нагрузки при печати строительных объектов промышленно производимыми принтерами, определенной исходя из расчета нагрузок от возрастания веса укладываемых слоев при печати отдельных конструктивных элементов и элементов ландшафтного дизайна.

Испытания проводились непосредственно после формования образцов. Сдавливательный тест проводили до разрушения образцов, в процессе сдавливания фиксировались кривые «нагрузка P – перемещение Δ », «перемещение Δ – время t ». Значение структурной прочности (σ_0) системы рассчитывалось в точке, соответствующей началу деформирования образца, а значение пластической прочности ($\sigma_{пл}$) в точке начала трещинообразования и разрушения (соотношение 2.3):

$$\sigma = \frac{P}{\pi R^2}. \quad (2.3)$$

По результатам интерпретации сдавливающих тестов с постоянной скоростью нагружения рассчитывались следующие характеристики формоустойчивости:

- структурная прочность, характеризующая способность вязко-пластичной смеси воспринимать нагрузку без деформирования напечатанного слоя;
- пластическая прочность, характеризующая способность вязко-пластичной смеси воспринимать нагрузку без трещинообразования;
- относительная деформация слоя вязко-пластичной смеси до начала образования трещин.

Оценку статистической достоверности сдавливающих тестов производили для каждой серии образцов, в точках, соответствующих рассчитываемому показателю. Коэффициент вариации полученных результатов не превышает 10%.

Оценку технологических свойств производили по показателям пластичности, работоспособности и сохранности свойств смесей.

Для оценки работоспособности производили контроль сроков схватывания смесей при различных температурных условиях (0 °С, +10 °С, +20 °С, +30 °С) согласно ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка» на приборе Вика. Непосредственно после изготовления смесь укладывали в кольцо диаметром 150 мм и высотой 55 мм, образцы смеси выдерживались в климатической испытательной камере Тепло-Влага-Холод М60/100-1000 КТВХ. Испытания производили непосредственно после укладки смеси и далее через каждые 15 мин до момента начала схватывания смеси согласно данным испытаний на приборе Вика.

Начальную пластичность и кинетику схватывания оценивали по показателю пластической прочности $P_{пл}$ пенетрометрическим методом, предложенным и обоснованным нами в работе [135]. В качестве испытательного прибора выбран пенетромтр Georocket грунтовой универсальный S068 со стандартным плунжером $d = 6,4$ мм.

Измерения производили, погружая плунжер пенетромтра до заданной риски, на глубину 5 мм. Количество выполненных измерений – 6 на каждое время измерения. По результатам испытаний оценку пластической прочности ($P_{пл}$) определяли как приведенную величину сопротивления пенетрации:

$$P_{пл} = \frac{4N}{\pi d^2}, \quad (2.4)$$

где N – сопротивление пенетрации смеси при погружении плунжера стандартного диаметра на глубину 5 мм, кН; d – диаметр плунжера, м².

Оценку погрешности результатов измерений и учет полученных результатов, проводили с помощью критерия Шовене, применительно к нормальному закону распределения данных. Погрешность пенетрометрического метода при определении пластической прочности $P_{пл}$ составляет 10 %.

2.3.2 Методика комплексной оценки структуры и свойств бетонов

Оценку физико-механических свойств и показателей физико-климатической стойкости бетонов производили с использованием монолитных образцов-кубов с размером ребра $50 \times 50 \times 50$ мм, что соответствует максимальному размеру печатного слоя и учитывает размер частиц заполнителя, не превышающий 5 мм.

Матрица экспериментальных исследований представлена в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Методика экспериментальных исследований по оценке качества бетона

№ п/п	Вид испытываемого образца	Исследуемые характеристики	Применяемые методы исследования (используемый прибор)	Кол-во испытаний
1	Монолитный образец-куб с размером ребра 50 мм	Кинетика набора прочности	Испытания на сжатие ГОСТ 10180-2012 (универсальная испытательная система INSTRON Sates 1500HDS, климатическая испытательная камера Тепло-Влага-Холод М60/100-1000 КТВХ)	6, на каждый период
2		Водопоглощение	Методика ГОСТ 12730.3-2020 (сушильный шкаф, весы)	6
3		Морозостойкость	Методика ГОСТ 10060-2012 (морозильная камера, универсальная испытательная система INSTRON Sates 1500HDS)	6
4	Монолитный образец-пластина размером 10x40x160 мм	Усадка композита (в эксплуатационном диапазоне обезвоживания)	Авторская методика	6

Для исследования кинетики набора прочности и оценки физико-механических свойств образцы-кубы испытывали на сжатие согласно методике, представленной в ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», в возрасте 1, 3, 7, 14, 28 суток при выдерживании нормальных температурно-влажностных условиях ($t = 20 \pm 5$ °C, $W \cong 100$ %); в возрасте 2, 3, 4 месяцев и 1 год при выдерживании в естественных условиях ($t = 20 \pm 5$ °C, $W \cong 50-60$ %).

Определение естественной влажности, полного и эксплуатационного водопоглощения, а также коэффициента размягчения производилось согласно ГОСТ 12730.3-2020 «Бетоны. Метод определения водопоглощения».

Морозостойкость определялась в соответствии с ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости» по первому базовому методу попеременным замораживанием-оттаиванием образцов-кубов. Основные и контрольные образцы перед испытанием насыщались водой в течение 40 часов. Продолжительность одного цикла замораживания при $t = -(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ составляла не менее 4 часов, продолжительность цикла оттаивания при $t = (18 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(95 \pm 2)^\circ\text{C}$ также не менее 4 часов. Контрольные образцы до испытания на сжатие выдерживались при $t = (18 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(95 \pm 2)^\circ\text{C}$ в течение времени, соответствующему числу циклов замораживания-оттаивания. Относительное снижение прочности (R_{rel}) основных образцов рассчитывалось по формуле:

$$R_{\text{rel}} = \left(1 - \frac{R_{\text{mtn}}}{R_{\text{mtk}}} \right) \cdot 100, \quad (2.5)$$

где R_{mtn} – среднее значение прочности основных образцов после заданного числа циклов испытаний, МПа; R_{mtk} – среднее значение прочности контрольных образцов, МПа.

Определение усадочных деформаций при высыхании архитектурного бетона проводили в условиях обезвоживания, моделирующих развитие усадки в тонкослойных печатных конструкциях, в которых оказывается бетон после окончания безопалубочной печати. Для этого изготавливали образцы-пластины размером $10 \times 40 \times 160$ мм, обезвоживание которых производили при заданных температуре (t) и влажности среды (W) до достижения постоянной массы и размеров. Для создания температурно-влажностного режима образцы-пластины помещали в эксикатор над раствором $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (моделирование эксплуатационных условий высыхания,

$t = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W = 30\%$), а затем обезвоживали над сухим веществом CaCl_2 (моделирование условий полного обезвоживания, $t = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W = 5\%$).

Линейные деформации образцов фиксировали с помощью индикатора часового типа (погрешность измерений $\pm 0,005\text{ мм}$), взвешивание образцов велось с погрешностью $\pm 0,05\text{ г}$. Контроль за изменением массы и длины образцов первоначально производился в течение первых 2 часов после суточного твердения образцов в форме, затем в сроки 3, 7, 14, 28 суток и далее с периодичностью 1 раз в 14 суток. Выдерживание образцов осуществлялось до стабилизации массы и линейных размеров.

Фазовый состав бетонов определяли рентгенодифрактометрическим методом при помощи порошкового дифрактометра ARL X'TRA. Образцы для измерений готовили путём измельчения части образца, отобранной после проведения испытания на сжатие, в однородный порошок. Измерения проводили при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, угол 2θ варьировали от 10 до 70 ° , скорость съёмки $5\text{ }^{\circ}/\text{мин}$, шаг $0,03\text{ }^{\circ}$, использовали $\text{CuK}\alpha$ – излучение (медная рентгеновская трубка, $\lambda = 1,541788\text{ \AA}$). Полученные данные обрабатывали при помощи комплекса компьютерных программ PDWin 4.0.

Микроструктуру гидратных новообразований цементного камня исследовали с помощью метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Для съёмки образцов использовался сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM – 7001F, в качестве образцов использовали скол образцов мелкозернистых цементных композиционных материалов.

2.3.3 Методика промышленной апробации результатов исследования

Промышленная апробация результатов исследования производилась в опытно-промышленном центре ФГБОУ ВО «ВГТУ» на промышленном принтере «KEYCODE» модели «КРАФТЕР-У» (рисунок 2.1). Промышленный принтер имеет

портальную конструкцию с размером рабочей поверхности 2×3 метра и максимальной высотой печати 1 метр. Высота печатного слоя регулируется путем задания положения головки экструдера в диапазоне 5-50 мм, ширина печатного слоя зависит от диаметра экструдера и объема подаваемой смеси, варьируется в диапазоне 20-50 мм. Согласно техническим характеристикам принтера, максимальный размер зерен применяемого заполнителя – 5 мм.



Рисунок 2.1 – Промышленный принтер «KEYCODE» модели «КРАФТЕР-У»

Принтер оснащен автоматической системой приготовления и подачи смеси, которая синхронизирована с работой принтера, что обеспечивает непрерывную подачу смеси в процессе печати.

Перед непосредственным процессом печати производилась подготовка моделей для печати и их преобразование в понятный для принтера G-code.

На первом этапе создавалась трехмерная модель изделия в графическом редакторе, имеющем техническую возможность создания CAD-модели объекта с заданными геометрическими размерами.

На втором этапе, в программном комплексе «SuperSlicer» версии 2.7.62.0 модель разделяли на отдельные плоские слои.

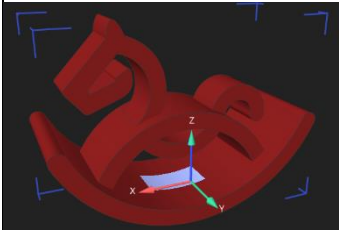
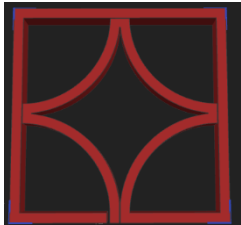
После получения набора плоских моделей, на третьем этапе, задавали основные параметры режима печати (скорость печати, скорость вращения шнека, высота слоя, определяемая как расстояние между соплом и предыдущим слоем или поверхностью основания печати) и определяли траекторию движения головки экструдера принтера по центру тяжести печатного слоя, описываемую G-code, понятным принтеру для осуществления печати. G-code представляет собой набор координат, определяющих положение головки экструдера принтера в пространстве, и команд для выполнения задач, таких как, подача смеси, пауза, скорость передвижения, скорость вращения шнека и др.

Геометрические характеристики выбранных объектов и параметры их печати представлены в таблице 2.10.

Приготовление смесей начинали с определения требуемого объема компонентов, необходимых для печати заданного изделия и создания запаса, необходимого для корректной работы принтера и печати качественного слоя. После подготовки компонентов производили непосредственное приготовление смеси путем предварительного перемешивания сухих компонентов смеси (портландцемент, мелкозернистый наполнитель, пигмент, сухой модификатор) в высокоскоростном

смесителе и подготовки затворителя (вода, жидкий модификатор, суперпластифицирующая добавка). Затем подготовленный затворитель вводили в смеситель и перемешивали в течении трех минут.

Таблица 2.10 – Геометрические параметры архитектурных форм и режимы их печати

№	Характеристика объектов	Режимы печати	
		Наименование	Значение
1	 Малая архитектурная форма «Лошадь» Высота – 65 см, ширина – 90 см, толщина – 7,5 – 18 см	Скорость печати	5 м/мин
		Скорость вращения шнека	120 об/мин
		Высота печатаемого слоя	15 мм
		Режим печати	Послойный
		Диаметр сопла	20 мм
2	 Вазон Высота – 25 см Размер в плане 26 x 26 см	Скорость печати	3 м/мин
		Скорость вращения шнека	110 об/мин
		Высота печатаемого слоя	13 мм
		Режим печати	«Ваза» (по спирали)
		Диаметр сопла	20 мм
3	 Декоративный элемент Размер в плане 43 x 43 см	Скорость печати	5 м/мин
		Скорость вращения шнека	150 об/мин
		Высота печатаемого слоя	10 мм
		Режим печати	Послойный
		Диаметр сопла	20 мм

При промышленной апробации контроль пластичности смеси осуществляли пенетрометрическим методом с помощью пластометра, разработанного и запатентованного коллективом авторов Научно-образовательного академического центра строительного материаловедения ВГТУ (рисунок. 2.2) [136]. Перед началом и в конце печати производили отбор пробы смеси в 3 кольца с диаметром 10 см и высотой 5 см, в каждом из которых производили по 2 измерения (всего в серии 6 точек), на основании среднего определялась оценка предела пластичности на соответствие полученным ранее в лабораторных условиях значениям.

В процессе печати объектов визуально контролировали качество формируемого печатного слоя. В процессе экструзии и укладки смеси должны были отсутствовать основные дефекты слоя: расплыв, нарушение целостности, наплывы в местах изменения траектории печати, изменение высоты слоя при нагружении.

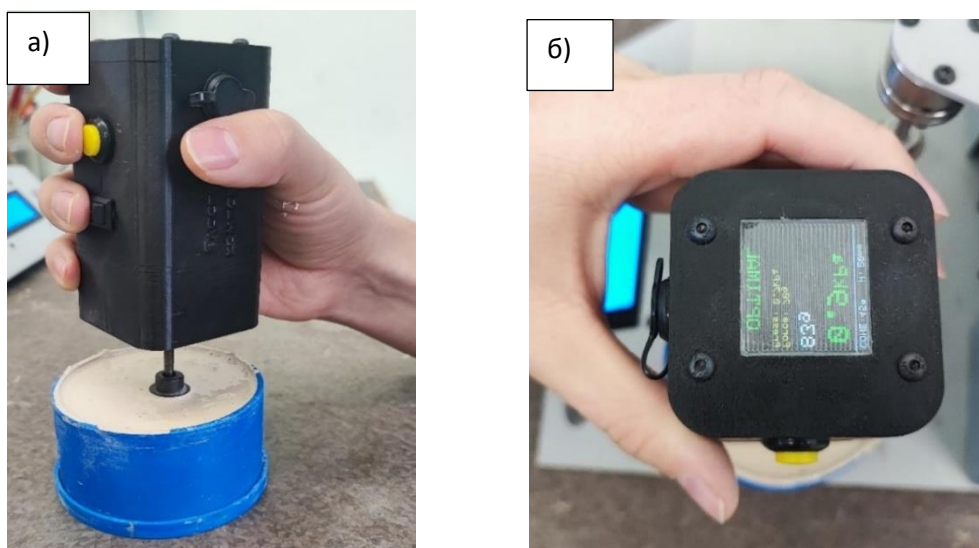


Рисунок 2.2 – Авторский пластометр а) вид сбоку, б) вид сверху

Геометрическое соответствие напечатанных объектов CAD-модели также фиксировали в процессе печати измерением ширины и высоты сформированного слоя и измерением общей высоты напечатанного объекта.

2.4 Выводы по главе 2

1. Охарактеризованы объект и предмет исследования. Объект исследования – мелкозернистые цементные бетоны для строительной 3D-печати, отличающиеся особыми технологическими характеристиками смесей: экструдированность и формоустойчивость. Предмет исследования – закономерности взаимосвязи состава, структуры и реологических свойств готовых к употреблению смесей как основа проектирования составов бетонов для строительной 3D-печати.

2. Для выявления взаимосвязи между составом, структурой бетонов и реологическими характеристиками смесей определено факторное пространство и запланирован следующий комплекс исследований:

- изучение влияния вида и концентрации заполнителя на реологическое поведение, пластичность и формоустойчивость смесей;
- изучение влияния состава цементной матрицы на реологическое поведение, пластичность и формоустойчивость смесей.

3. На основании полученных данных планируется запроектировать составы бетонов на различных видах сырья, произвести экспериментальную оценку реологических, технологических свойств смесей, комплекса физико-механических свойств бетонов на их основе. В результате будут разработаны методика проектирования составов, технологические решения по производству сухих смесей, а также изделий методом 3D-печати.

4. Апробацию предложенных решений планируется произвести:

- в процессе испытаний запроектированных составов при печати смесями на их основе на промышленном 3D-принтере;
- при изготовлении сухих смесей на основе запроектированных составов на типовом оборудовании завода сухих строительных смесей.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Исследование влияния гранулометрического состава и концентрации заполнителя на реологическое поведение цементных систем

В данном разделе представлены результаты исследований влияния гранулометрического состава и концентрации заполнителя, вводимого в единицу объема цементной матрицы, на реологические характеристики модельных мелкозернистых цементных растворов. Технологически концентрация вводимого заполнителя определялась как массовое соотношение цемента к заполнителю. Выбор вида заполнителей обусловлен их сопоставимой дисперсностью, но разным гранулометрическим составом. Распределение по размерам частиц кварцевого песка является полифракционным ($d = 0,1-0,63$ мм, см. табл. 2.3.), а карбонатного – монофракционным ($d \approx 0,63$ мм). Принятые виды заполнителя отличаются также по кристаллохимическому составу, но оба являются химически инертными к цементу, также, в силу достаточно большого размера частиц, их влияние на процессы гидратации представляется пренебрежимо малым.

Фактор изменения массового соотношения цемента к заполнителю является приоритетным фактором регулирования вязко-пластических свойств, агрегативной устойчивости и структурной прочности цементных растворов. Однако мера влияния данного фактора определяется свойствами заполнителя.

На первом этапе эксперимента исследованы два вида модельных систем: Ц – П (цементная матрица – кварцевый песок), Ц – К (цементная матрица – карбонатный песок). Для модельных систем производили варьирование массового соотношения цемента к заполнителю в диапазоне от 1 : 1 до 1 : 2, в качестве постоянного параметра был принят состав цементной матрицы, включающий цемент, воду, пластифицирующую добавку и консистенция мелкозернистого раствора, обеспечиваемая за счет $B/C = 0,28-0,31$. Варьирование массового соотношения цемента к поли-

и монодисперсным заполнителям производилось для установления вида и количества заполнителя, обеспечивающих необходимые критериальные для строительной 3D-печати показатели пластичности и формоустойчивости.

Для всех рассматриваемых систем на основании фракционного состава, плотности упаковки частиц заполнителя и массовых соотношений компонентов состава рассчитывались значения структурных параметров (средний диаметр частиц заполнителя, толщина прослойки цементной матрицы, отношение объемов компонентов смеси).

3.1.1 Результаты оценки реологического поведения цементных систем

В результате исследования реологического поведения модельных систем «цемент + вода + СП + кварцевый песок», «цемент + вода + СП + карбонатный песок» на основании проведенного сдвигающего теста с постоянной скоростью деформирования, были получены экспериментальные кривые $F^*=f(h_i/R)$ (рисунок 3.1, таблица 3.1).

Характер кривых систем с полифракционным заполнителем (кварцевый песок) с массовым соотношением Ц : П = 1 : 1-1,25, отвечает типу кривых $F^*(h_i/R)$, имеющему выраженный горизонтальный участок пластического деформирования в диапазоне $h_i/R = 0,5-0,9$, на котором происходит течение структуры с сохранением ее целостности, что обеспечивает процесс экструдирования смеси в процессе печати, при этом значения оценки предела пластичности $K_i(I)$ находятся в диапазоне от 1,0 до 1,3 кПа, что характеризует данные системы как пластичные.

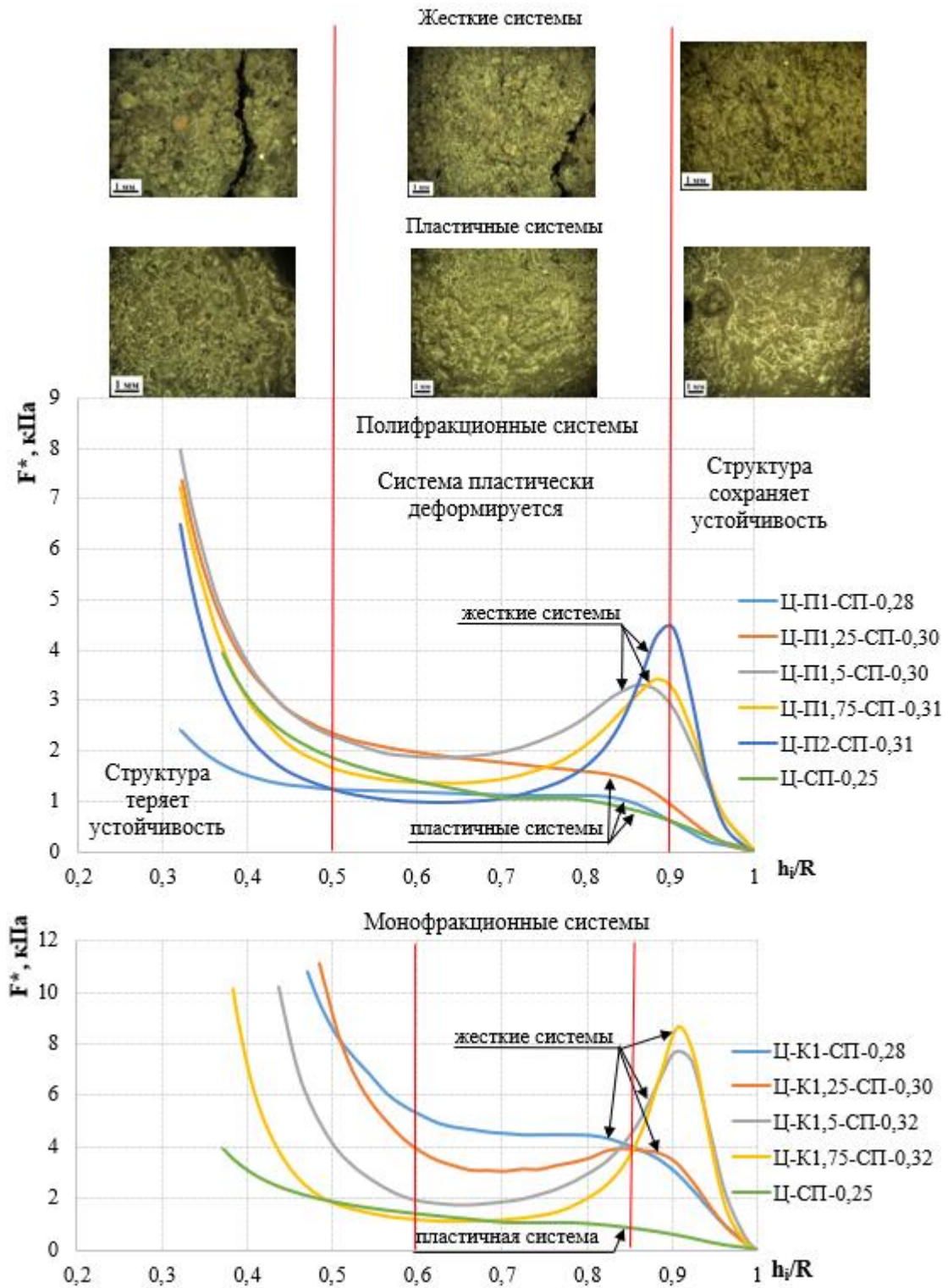


Рисунок 3.1 – Экспериментальные кривые $F^*=f(h_i/R)$ для модельных систем

Таблица 3.1 – Влияние концентрации заполнителя в модельных мелкозернистых системах «цемент + заполнителя + пластифицирующая добавка + вода»

Обозначение системы	Рецептурные параметры			Структурные параметры				Реологические характеристики			
	Вид заполнителя	Массовое соотношение Ц:З	Плотность упаковки заполнителя, %	$V_{цм}/V_3$	Толщина прослойки $\delta_{цм}$, мкм	Средний диаметр частиц заполнителя $d_{ср}$, мкм	$\delta_{цм}/d_{ср}$	Оценка предела пластичности $K_i(I)$, кПа	Структурная прочность σ_0 , кПа	Пластическая прочность $\sigma_{пл}$, кПа	Относительные пластические деформации $\Delta_{пл}$, мм/мм
Ц-СП-0,25	-							1,0	0,7	43,2	0,13
Ц-П1-СП-0,28	Кварцевый песок	1 : 1	61,19	1,6	59,1	274	0,22	1,0	2,5	38,9	0,11
Ц-П1,25-СП-0,30		1 : 1,25		1,4	49,8		0,18	1,3	2,7	39,9	0,09
Ц-П1,5-СП-0,30		1 : 1,5		1,1	32,5		0,12	2,8	0,8	45,3	0,05
Ц-П1,75-СП-0,31		1 : 1,75		1,0	25,2		0,09	2,8	0,7	35,2	0,03
Ц-П2-СП-0,31		1 : 2		0,9	20,4		0,07	3,8	Исследование формоустойчивости систем, не способных к пластическому течению в процессе экструдирования, не выполнялось		
Ц-К1-СП-0,28	Карбонатный песок	1 : 1	59,66	1,6	178,8	846	0,21	3,3			
Ц-К1,25-СП-0,30		1 : 1,25		1,4	125,8		0,15	3,3			
Ц-К1,5-СП-0,32		1 : 1,5		1,1	83,9		0,10	6,7			
Ц-К1,75-СП-0,32		1 : 1,75		1,0	56,8		0,07	7,5			

При повышении массового соотношения $\text{Ц} : \text{П} \geq 1 : 1,5$ характер кривых $F^*(h_i/R)$ резко изменяется, в данных кривых явно выражен перегиб при величине приведенной нагрузки F^* более 3 кПа, и значением оценки предела ползучести $K_i(I)$ более 2,8 кПа, соответственно. Данная точка перегиба, характеризует преодоление порога устойчивости и соответствует началу течения, при резком падении напряжения, свидетельствующем об интенсивном развитии трещинообразования в образце и течении системы с полностью разрушенной структурой. Для данных систем значения оценки предела пластичности $K_i(I)$ находятся в диапазоне 2,8-3,8 кПа, что характеризует данные системы с массовым соотношением $\text{Ц} : \text{П} \geq 1 : 1,5$ как жесткие.

Для систем «цемент + вода + СП + карбонатный песок» (рисунок 3.1) реологическое поведение отвечает также двум типам кривых $F^*=f(h_i/R)$, с горизонтальным участком и перегибом. В системах с массовым соотношением $\text{Ц} : \text{К} = 1 : 1-1,25$, кривая реологического поведения соответствует типу, с выраженным горизонтальным участком в диапазоне $h_i/R = 0,60-0,85$, однако, значение оценки предела пластичности $K_i(I) = 3,3$ кПа, что позволяет классифицировать данные системы как жесткие, несмотря на тип полученной кривой. При увеличении дозировки заполнителя $\text{Ц} : \text{К} \geq 1 : 1,5$ кривые $F^*=f(h_i/R)$ для всех систем относятся к типу, с явно выраженным перегибом, после преодоления оценки предела пластичности $K_i(I) = 6,7-7,5$ кПа структура таких систем необратимо разрушается. Это характеризует данные системы с соотношением $\text{Ц} : \text{К} \geq 1 : 1,5$ как предельно жесткие и неэластичные, неспособные к пластическому течению с неразрушенной структурой. Таким образом, все системы с карбонатным песком относятся к жестким и проявляют способность к течению только после разрушения целостности структуры и преодоления оценки предела пластичности $K_i(I) \geq 3,3$ кПа. Полученные результаты опубликованы в работе [137].

На втором этапе эксперимента, для систем, пригодных к экструдированию в соответствии с технологическими возможностями принтеров, при сдавливающем тесте с постоянной скоростью нагружения были получены приведенные кривые

«относительные деформации – напряжение», «относительные деформации – время» (рисунок 3.2).

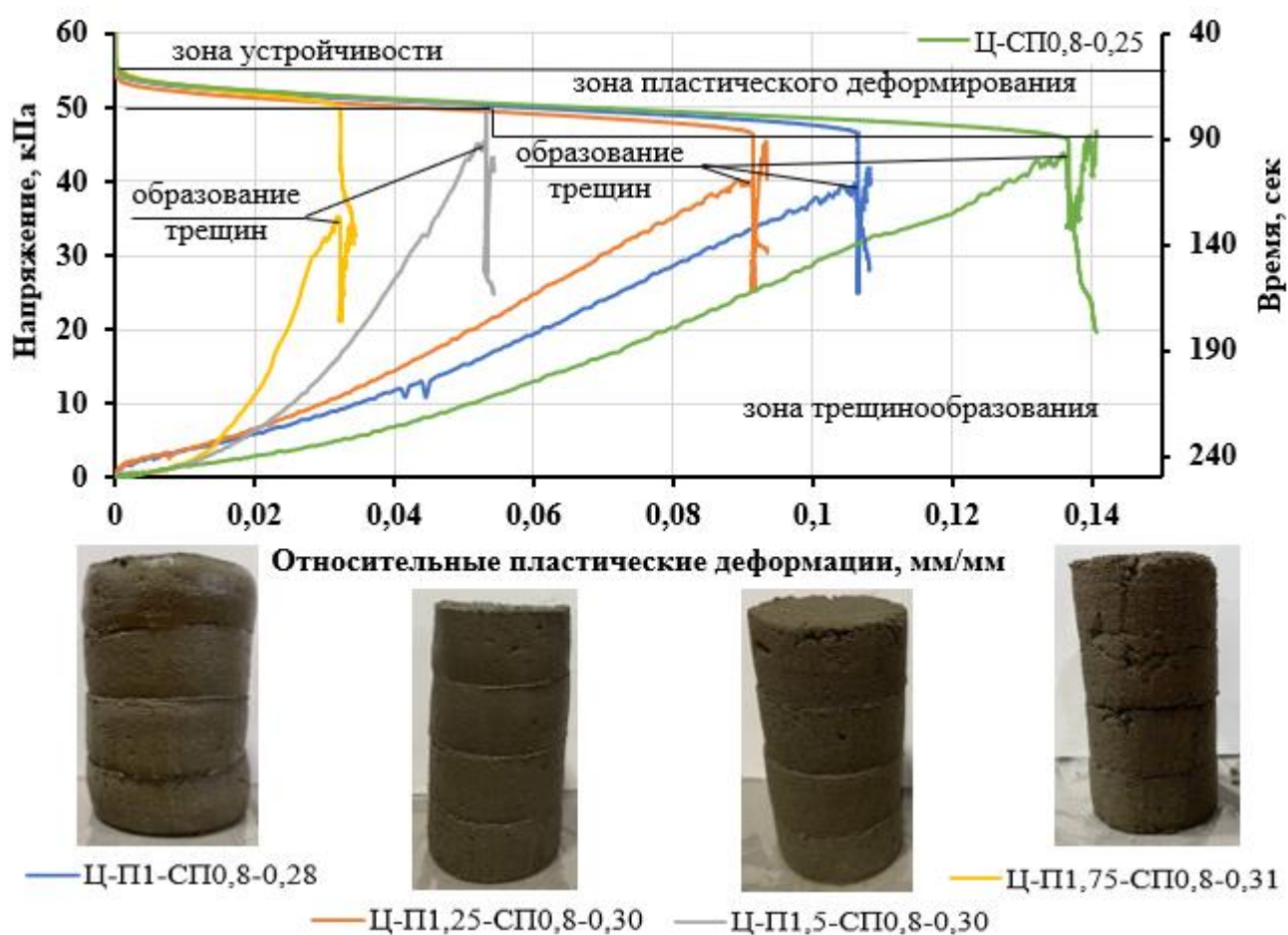


Рисунок 3.2 – Приведенные экспериментальные кривые «относительные деформации – напряжение», «относительные деформации – время» для модельных систем

На всех полученных кривых выделяются три основных зоны деформирования:

- структура смеси сохраняет свою целостность и слой не деформируется, «зона устойчивости»;
- структура смеси сохраняет свою целостность и происходит пластическое течение материала слоя, «зона пластического деформирования»;
- нарушение целостности структуры смеси посредством образования и развития трещин, «зона трещинообразования».

При общем соответствии типа кривых для всех испытанных систем, в начальный момент испытаний характер кривых для системы с полифракционным заполнителем (кварцевый песок) с массовым соотношением Ц : П = 1 : 1-1,25 отличается от систем Ц : П = 1 : 1,5-1,75. Для систем Ц : П = 1 : 1-1,25 обеспечиваются высокие значения структурной прочности и находятся в диапазоне $\sigma_0 = 2,5-2,7$ кПа, системы Ц : П = 1 : 1,5-1,75 практически не имеют структурной прочности при относительных деформациях 0,4 % $\sigma_0 = 0,7-0,8$ кПа, при этом для этих систем характерно существенное уменьшение периода образования и накопления микротрещин, нарушение целостности структуры смеси происходит при $\Delta_{пл} = 0,03-0,05$ мм/мм, в то время как для систем Ц : П = 1 : 1-1,25 значения относительных пластических деформаций в момент разрушения находятся в диапазоне 0,09-0,11 мм/мм. При этом нарушение целостности структуры во всех системах наступает после достижения пластической прочности $\sigma_{пл} = 35,2-45,3$ кПа.

Влияние кристаллохимических особенностей строения и соответственно, свойств поверхности заполнителя на свойства цементной матрицы, в силу достаточно большого размера частиц заполнителя представляется пренебрежимо малым. Именно поэтому, можно утверждать, что существенная разница в реологическом поведении определяется гранулометрическим составом заполнителя и массовым соотношением цемента к заполнителю.

На основании сдвигающего теста с постоянной скоростью деформирования пригодными к печати являются только составы на полифракционном заполнителе, поскольку системы на монофракционном заполнителе характеризуются как жесткие и для них оценка предела пластичности превышает 2,5 кПа, что является технологическим ограничением для строительных принтеров.

Рациональными реологическими характеристиками, обеспечивающими экструдированность по показателю оценки предела пластичности и формоустойчивость по показателю структурной прочности, обладают системы на полифракционном заполнителе (рисунок 3.3).

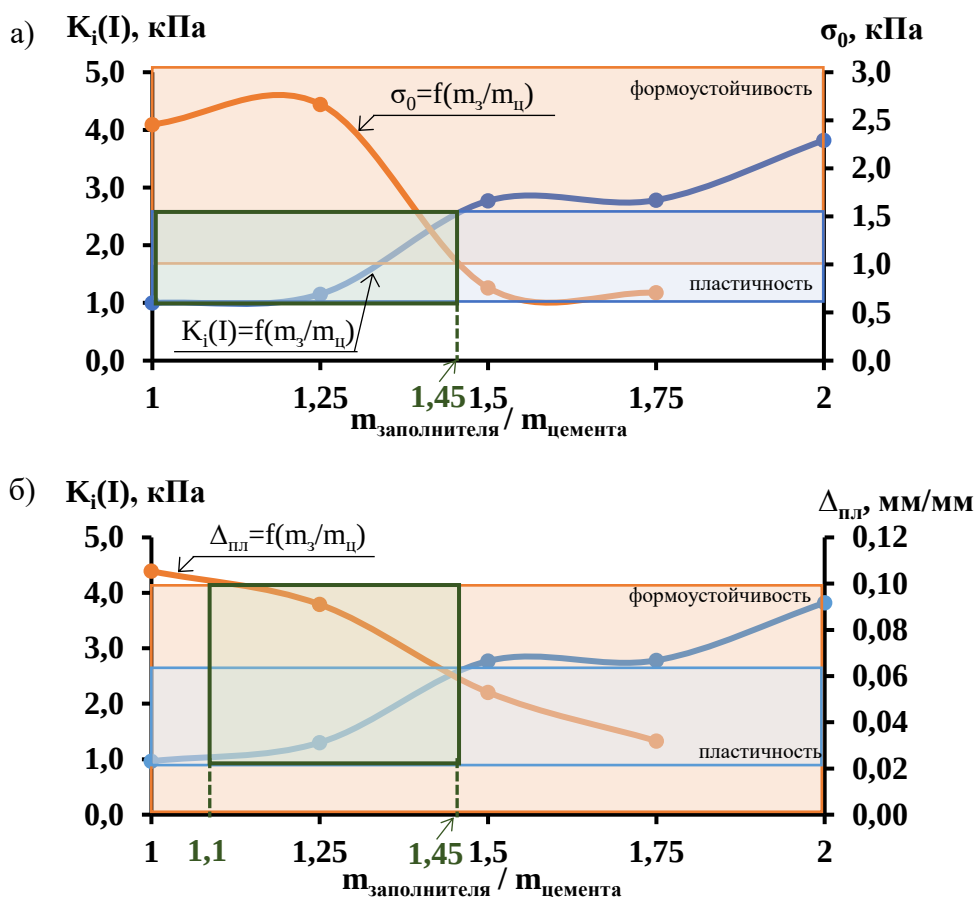


Рисунок 3.3 – Изменение реологических характеристик систем с различным массовым соотношением полифракционного заполнителя к цементу

а) оценка предела пластичности – структурная прочность

б) оценка предела пластичности – относительные пластические деформации

На основании проведенных исследований можно заключить, что монофракционные заполнители не могут обеспечить комплекс реологических характеристик при варьировании рецептурных параметров, массовая доля 100-175 %, данные заполнители не позволяют получить пластичные смеси, способные к перекачиванию и экструзии без нарушения целостности структуры.

Установлено, что рациональным, позволяющим обеспечить комплекс реологических характеристик, является массовая доля полифракционного заполнителя 110-145 % от массы цемента. В диапазоне данных дозировок, смесь на полифракционном заполнителе обладает пластичностью ($K_i(I) = 1,0-2,5$ кПа) и агрегативной устойчивостью, одновременно характеризуется достаточной структурной прочно-

стью ($\sigma_0 \cong 1-3$ кПа) и небольшими пластическими деформациями $\Delta_{пл}$, не превышающими предельного технологического значения в 10 % при нагружении цементных систем сразу после их изготовления.

3.1.2 Расчет параметров структуры цементных систем

Изменение массовых соотношений цемента и заполнителя, закономерно влияет на изменение структурных параметров цементных систем. Расчетное соотношение объемных долей заполнителя и цементной матрицы при возрастании массового соотношения Ц : П в составе смеси представлено на рисунке 3.4.

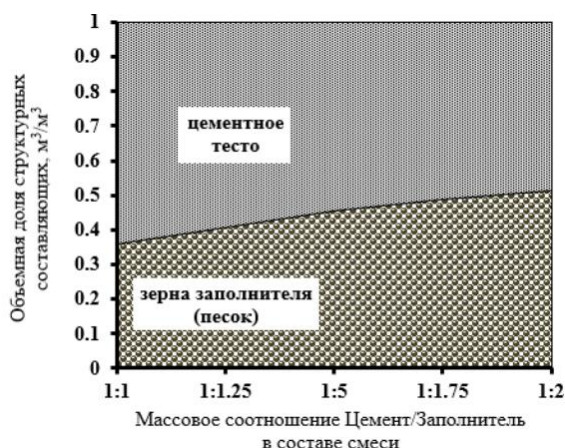


Рисунок 3.4 – Распределение объемных долей компонентов смесей

При проведении расчетов толщина прослойки цементной матрицы определялась из условия максимальной удаленности частиц друг от друга в занимаемом единичном объеме. На основании данного предположения были установлены диапазоны изменения толщины прослойки цементной матрицы в зависимости от концентрации заполнителя в системе, которые опубликованы в работе [138].

Для уточнения полученных результатов, при расчете структурных параметров необходимо учитывать реальную плотность упаковки частиц заполнителя, а не расчетную, в связи со сложностью прогнозирования структуры сложения заполнителя, состоящего из произвольного набора фракций.

При этом в зависимости от исходных характеристик заполнителя, а именно, от плотности упаковки частиц, фракционного состава, при одинаковых массовых соотношениях цемента к заполнителю и объемных соотношениях цементной матрицы и заполнителя, будет меняться другой структурный параметр – толщина прослойки цементной матрицы между частицами заполнителя ($\delta_{\text{цм}}$ мкм, рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Геометрическое представление о структуре сложения двухкомпонентной системы «цементная матрица – зерна заполнителя»

Толщину прослойки цементной матрицы модельных систем определяли, опираясь на ряд допущений:

- структура сложения частиц заполнителя сохраняется, изменение положения частиц изменяется только увеличением расстояния между ними на толщину прослойки цементной матрицы (см. рис. 3.5);

- все частицы заполнителя имеют форму шара диаметром, равным среднему значению между размером ячеек стандартного набора сит (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Используемые параметры частиц заполнителя

№	1	2	3	4	5
Размер сит	5-2,5	2,5-1,25	1,25-0,63	0,63-0,315	0,315-0,16
Диаметр частиц d_i , мм	3,750	1,875	0,940	0,473	0,238
Объем частицы $\frac{\pi d_i^3}{6}$, мм ³	27,612	3,451	0,435	0,055	0,007

На основании первого допущения, принятых параметров частиц, фракционного состава заполнителя, определенного путем рассева по стандартным ситам, и экспериментально определенной плотности упаковки заполнителя (φ) для каждого случая можно рассчитать толщину прослойки ($\delta_{\text{цм}}$) исходя из того, что она равна двум обмазочным слоям. Тогда объем частиц можно определить из условия увеличения диаметра каждой частицы на $\delta_{\text{цм}}$.

Объем цементной матрицы ($V_{\text{цм}}$) в каждом случае расходуется на создание прослоек ($V_{\text{пр}}$) и заполнение межзерновых пустот ($V_{\text{мзп}}$), поэтому толщину прослойки можно определить через общий объем цементной матрицы:

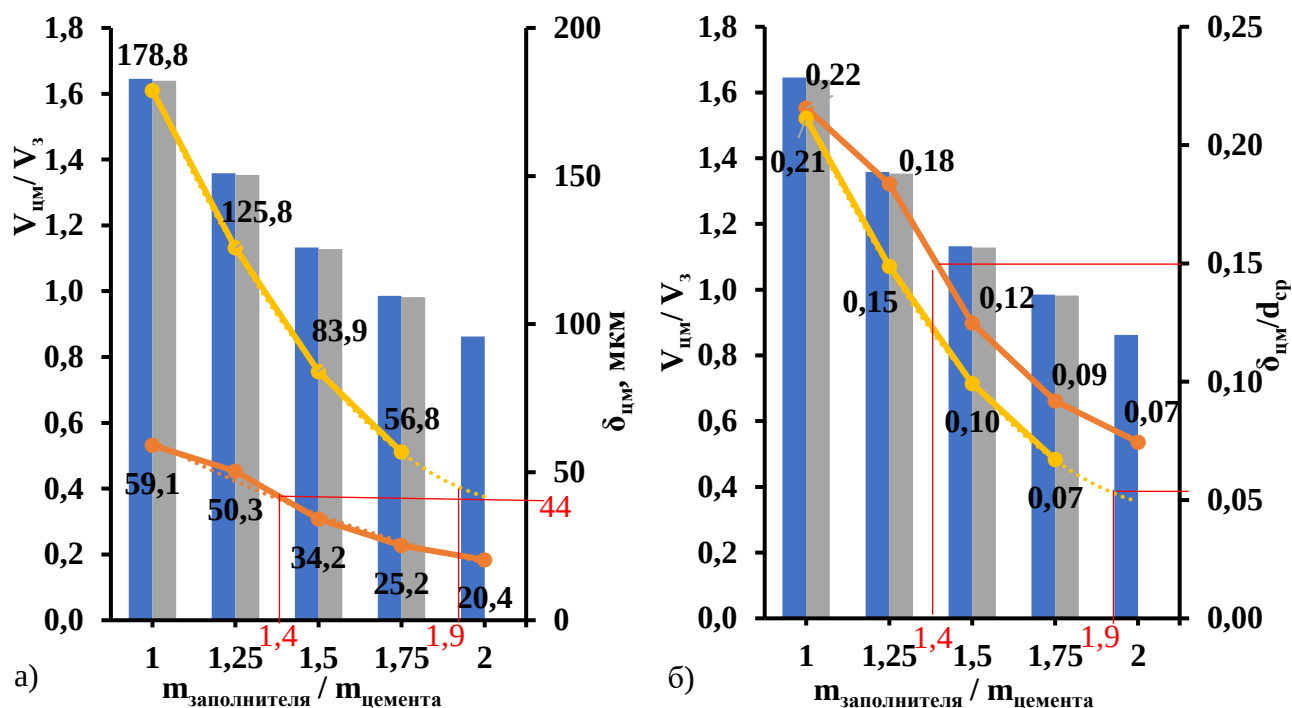
$$V_{\text{пр}} = V_{\text{цм}} - V_{\text{мзп}} \quad (3.1)$$

$$V_{\text{мзп}} = V_3 \cdot \frac{1 - \varphi}{\varphi} \quad (3.2)$$

$$V_{\text{прослоек}} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i \cdot \pi \cdot (d_i + \delta_{\text{цм}})^3}{6} - \sum_{i=1}^n \frac{N_i \cdot \pi \cdot (d_i)^3}{6} \quad (3.3)$$

где N_i – количество частиц i -ой фракции.

В исследованных модельных системах толщина прослойки в смесях с полифракционным заполнителем составляет от 20 до 60 мкм, с монофракционным – от 57 до 179 мкм (рисунок 3.6, а).



Обозначено: ■ и ■ – изменение объемных соотношений полифракционного и монофракционного заполнителя соответственно, от массовых соотношений, — и — – изменение толщины прослойки или отношение толщины прослойки цементной матрицы к среднему диаметру частиц заполнителя для полифракционного и монофракционного заполнителя соответственно

Рисунок 3.6 – Взаимосвязь рецептурных и структурных параметров мелкозернистого цементного бетона

- а) взаимосвязь массовых соотношений с объемным и абсолютным значением толщиной прослойки цементной матрицы,
 б) взаимосвязь массовых соотношений с объемными и отношением толщины прослойки цементной матрицы к среднему диаметру частиц заполнителя

Одно из ограничений на мезоуровне на основании структурных составляющих – толщина прослойки больше размера зерна цемента. В исследуемых системах применяли цемент СЕМ I 42,5R, имеющий частицы размером до 44 мкм (см. табл. 2.1), что будет являться критическим размером в рассматриваемых системах, результаты опубликованы в работе [138]. Исходя из данного ограничения, установлено, что рациональной, позволяющей обеспечить заданные структурные параметры в исследуемых системах, является массовая доля полифракционного заполнителя не более 140 % от массы цемента, при этом объемное отношение цементной

матрицы к заполнителю $V_{\text{цм}}/V_3 \geq 1,2$, а монофракционного заполнителя – не более 190 %, $V_{\text{цм}}/V_3 \geq 0,9$.

При этом, абсолютная величина прослойки объективно не отражает картину при изменении среднего размера частиц, поэтому предложен структурный параметр, отражающий взаимную связь толщины прослойки и диаметра частиц заполнителя – отношение толщины прослойки между частицами к среднему диаметру частиц – $\delta_{\text{цм}}/d_{\text{ср}}$, (рисунок 3.6, б). Для систем на полифракционном заполнителе структурный параметр $\delta_{\text{цм}}/d_{\text{ср}} \geq 0,15$, на монофракционном – 0,05.

3.1.3 Обоснование требований к параметрам структуры, критериальных для обеспечения технологичности смеси

В соответствии с положениями структурной реологии дисперсных систем исследуемые смеси рассматривают как двухкомпонентную гетерогенную систему на мезоуровне: «цементная матрица + заполнитель». При этом предполагается, что объем, вязкость и плотность дисперсионной среды (цементной матрицы) определяет способность системы к пластическому течению. Содержание в структуре дисперсной фазы (заполнителя) будет определять жесткость и формоустойчивость системы. Поэтому достижение рационального соотношения технологических показателей пластичности (экструдированности) и формоустойчивости определяется толщиной прослойки вязко-пластичной цементной матрицы.

Рассмотренные модельные системы на монофракционном заполнителе по структурным параметрам удовлетворяют требованиям при массовом соотношении цемента к заполнителю не более 1 : 1,9, однако ни одна из рассмотренных систем не способна к пластическому течению. Это позволяет сделать вывод о непригодности смесей на монодисперсных заполнителях к технологии печати.

Также, ранее было установлено, что для модельных систем на полифракционном заполнителе для обеспечения комплекса реологических характеристик, массовая доля заполнителя составляет 110-145 % от массы цемента, а для обеспечения

структурных параметров – не более 140 %. Для получения смесей с заданными технологическими свойствами массовое соотношение цемента к заполнителю $m_{\text{ц}}/m_{\text{з}} = 1 : 1,1-1,4$, что является основным рецептурным параметром для получения смеси на данном виде заполнителя. Однако, при изменении характеристик заполнителя, массовые соотношения могут меняться, но при этом структурные параметры будут постоянными.

Для определения диапазона варьирования структурными параметрами смесей необходимо установить их взаимосвязь с реологическими характеристиками. Исходя из анализа значений оценки предела пластичности в модельных системах с различной наполняемостью (массовым отношением заполнителя к цементу), можно заключить, что системы способны к пластическому течению при отношении объема цементной матрицы к объему заполнителя $1,2 \leq V_{\text{цм}}/V_{\text{з}} \leq 1,6$ (рисунок 3.7).

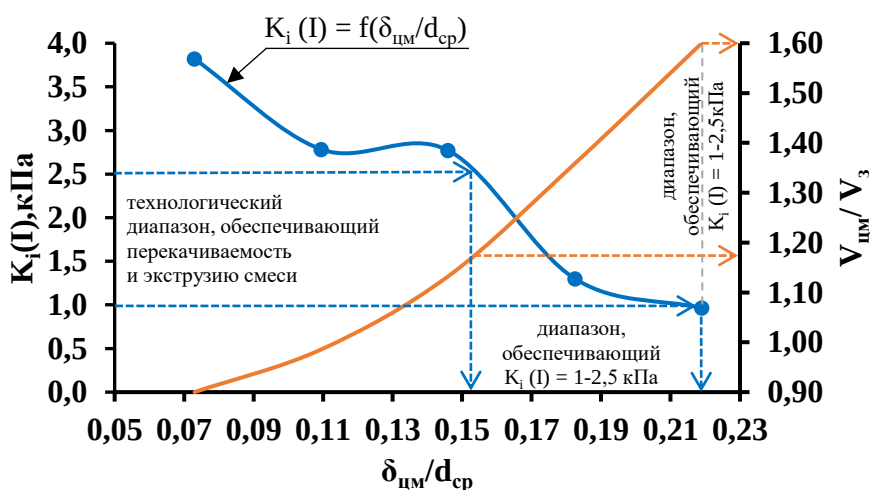


Рисунок 3.7 – Оценка влияния и границы варьирования структурных параметров для обеспечения экструзируемости (по оценке предела пластичности) модельных систем с полифракционным заполнителем

В тоже время объем цементной матрицы зависит от требуемой толщины прослойки цементной матрицы и объема пустот в заполнителе. Главным структурным параметром для рассматриваемых модельных систем является отношение толщины прослойки между частицами к среднему диаметру частиц. С учетом требований к пластичности (экструзируемости) по оценке предела пластичности ($K_i(I) = 1,0-2,5$

кПа) для систем на полифракционном заполнителе справедливо ограничение $0,15 \leq \delta_{\text{цм}}/d_{\text{ср}} \leq 0,22$ (см. рис. 3.7). Учитывая ограничение по структурным параметрам $V_{\text{цм}}/V_3 \geq 1,2$ и $\delta_{\text{цм}}/d_{\text{ср}} \geq 0,15$, то итоговый диапазон, учитывающий структурные параметры и способность смеси к экструдированности $0,15 \leq \delta_{\text{цм}}/d_{\text{ср}} \leq 0,22$.

Формоустойчивость модельных систем оценивалась по трем реологическим параметрам: структурная и пластическая прочности, и относительные пластические деформации (рисунок 3.8).

Исходя из анализа значений структурной прочности в модельных системах с различной наполняемостью, системы способны воспринимать собственный вес без деформирования ($\sigma_0 \geq 1$ кПа) при отношении объема цементной матрицы к объему заполнителя не менее 1,2, воспринимать нагрузку не менее 30 кПа до нарушения целостности структуры, что обеспечивается пластической прочностью ($\sigma_{\text{пл}} \geq 30$ кПа), при объемных отношениях не менее 0,9, и разрушение целостности систем наступает при относительных пластических деформациях не превышающих 10 % ($\Delta_{\text{пл}} \leq 0,1$ мм/мм) при объемных отношениях не более 1,5.

Можно заключить, что системы обладают требуемыми показателями формоустойчивости при отношении объема цементной матрицы к объему заполнителю $V_{\text{цм}}/V_3 = 1,2-1,5$.

С учетом требований к показателям формоустойчивости для систем на полифракционном заполнителе справедливо ограничение $0,15 \leq \delta/d_{\text{ср}} \leq 0,21$ (см. рис. 3.8).

Для обеспечения рационального соотношения технологических показателей пластичности и формоустойчивости для модельных систем окончательно установлен диапазон $\delta/d_{\text{ср}} = 0,15-0,21$.

Таким образом, было установлено, что рациональное соотношение технологических параметров можно обеспечить только для систем на полифракционных заполнителях, при структурных параметрах $0,15 \leq \delta/d_{\text{ср}} \leq 0,21$ и $1,2 \leq V_{\text{цм}}/V_3 \leq 1,5$, что определяет рецептурные ограничения $1 : 1,1 \leq m_{\text{ц}} : m_3 \leq 1 : 1,4$.

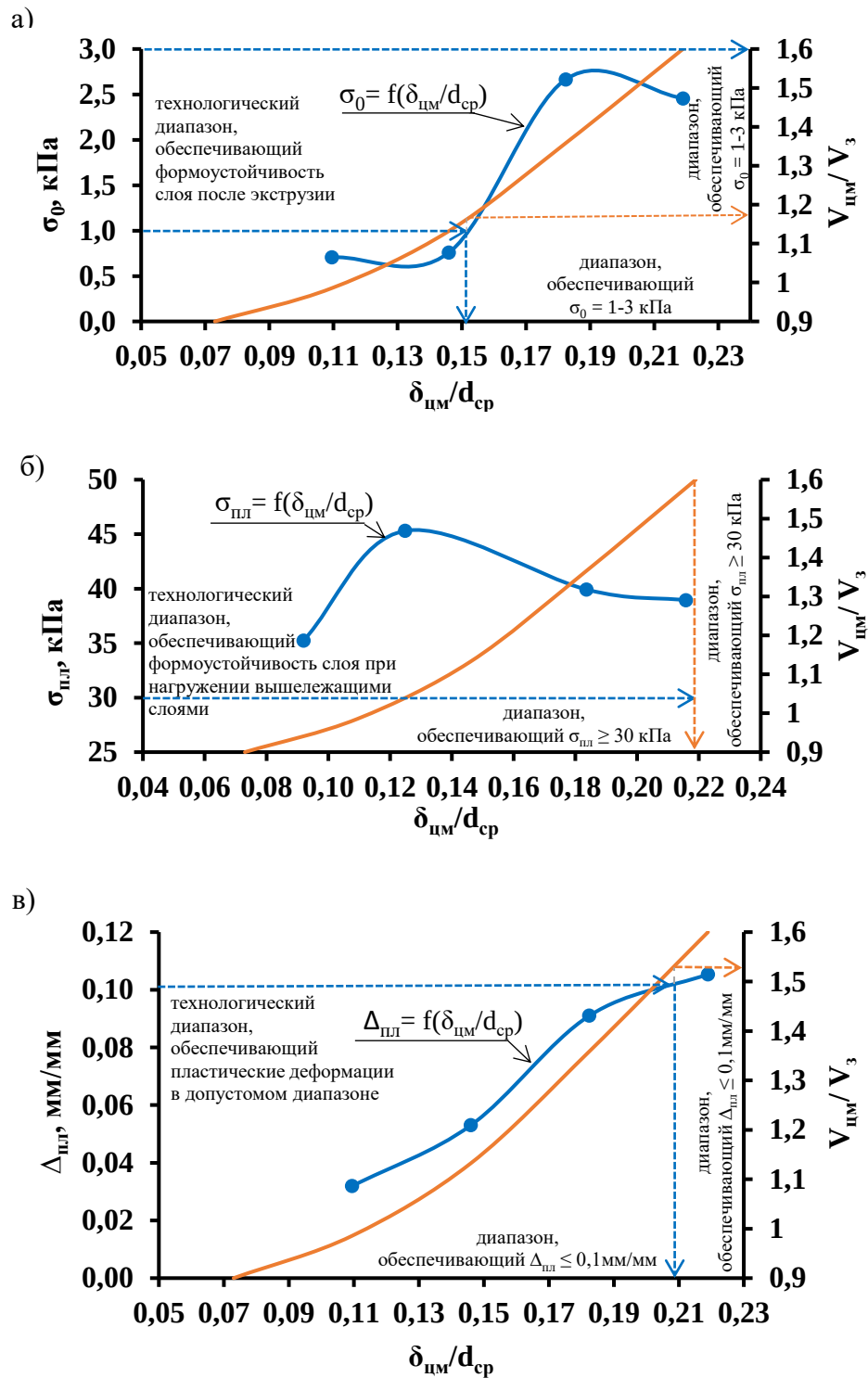


Рисунок 3.8 – Оценка влияния и границы варьирования структурных параметров для обеспечения формоустойчивости модельных систем по показателям
 а) структурной прочности; б) пластической прочности;
 в) относительных пластических деформаций

Таким образом, для проектирования составов мелкозернистых бетонов необходимо использовать:

1) параметры структуры: отношение толщины прослойки условно однородной вязко-пластичной цементной матрицы к среднему диаметру частиц заполнителя, варьируемый в диапазоне 0,15-0,21; отношение объема цементной матрицы к объему частиц заполнителя в диапазоне 1,2-1,5. Варьирование данных структурных параметров обеспечивается рецептурно-технологическим параметром – массовым соотношением цемента и заполнителя, диапазон варьирования зависит от исходных характеристик компонентов цементной матрицы и применяемого заполнителя;

2) требования к реологическим характеристикам бетонов: оценку предела пластичности $K_i(I) = 1,0-2,5$ кПа, структурную прочность $\sigma_0 = 1-3$ кПа, пластическую прочность $\sigma_{пл} \geq 30$ кПа и относительные пластические деформации $\Delta_{пл} \leq 0,1$ мм/мм.

Ранее установлена прямая сильная корреляция данных реологических параметров с комплексной технологической характеристикой – пластической прочностью (коэффициент корреляции $|r_{xy}| = 0,77-0,82$). При оценке данной характеристики с использованием универсального грунтового пенетрометра технологический диапазон варьирования $R_{пл} = 0,2-1,7$ кгс/см² [139], пластометра – $R_{пл} = 0,7-2,5$ кПа [140]. Поэтому при решении технической задачи подбора состава бетона предлагается использовать показатель пластической прочности, определяемый оперативно-техническими методами.

3.2 Оценка влияния состава цементной матрицы на свойства мелкозернистых смесей

На втором этапе эксперимента, для определения степени влияния состава цементной матрицы на реологические характеристики и структурные параметры цементно-песчаной смеси были исследованы четыре вида модельных систем, отличающихся по составу цементной матрицы. В качестве варьируемых параметров были приняты вид цемента (CEM I 42,5R и CEM I 52,5R), а также различные виды модифицирующих добавок: пластифицирующая добавка и модификатор вязкости (су-

перпластификатор и метакаолин) или пластифицирующая добавка, добавка-электролит и модификатор вязкости (суперпластификатор, тетракалийпирофосфат + камедь ксантановая). Вид цемента является эффективным методом регулирования пластичности и изменения формоустойчивости под нагрузкой при печати, результаты исследования опубликованы в работе [141]. Выбор модификаторов вязкости и добавок электролитов обусловлен их положительным влиянием на реологические характеристики смесей, путем повышения пластической прочности в 3-5 раз, (опубликовано в работе [73]), эффективность принятых добавок подтверждена запатентованными составами смесей [125, 126].

В качестве постоянных параметров были приняты вид, гранулометрический состав, дисперсность, средний диаметр частиц, количество заполнителя и консистенция цементного теста, регулируемая изменением В/Ц в диапазоне 0,28-0,32.

Исследуемые составы цементных матриц для 3D-печати характеризуются рациональными значениями реологических характеристик (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Реологические характеристики цементных смесей

Обозначение системы*	Реологические характеристики				Технологическая характеристика – пластическая прочность $R_{пл}$, кПа
	Оценка предела пластичности $K_i(I)$, кПа	Структурная прочность σ_0 , кПа	Пластическая прочность $\sigma_{пл}$, кПа	Относительные пластические деформации $\Delta_{пл}$, мм/мм	
Ц-СП-МКЛ	1,4	1,7	34,5	0,08	1,4
Ц-СП-ТКПФ-КМ	1,5	1,7	35,0	0,08	1,5
Цб-СП-МКЛ	2,5	0,4	55,2	0,11	2,5
Цб-СП-ТКПФ-КМ	2,5	0,4	43,9	0,10	2,5
Граничный диапазон характеристик	1,0-2,5	1-3	≥ 30	$\leq 0,1$	1,0-2,5

*Обозначено: цемент СЕМ I 42,5R (Ц), цемент белый СЕМ I 52,5R (Цб), суперпластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров (СП), модификаторы – метакаолин (МКЛ), тетракалий пирофосфат (ТКПФ), камедь ксантановая (КМ)

Базовые составы цементных матриц отвечают по своему реологическому поведению пластичным системам, способным к перекачиванию без разрушения структуры, а реологические и технологические характеристики находятся в требу-

емом технологическом диапазоне. При замене вида цемента, отличающегося по минералогическому и фракционному составу, наблюдается значительное снижение структурной прочности системы, при сохранении способности системы к перекачиванию.

В качестве модельных систем рассмотрены двухкомпонентные системы: цементная матрица и рационально подобранный заполнитель исходя из структурных параметров: $V_{\text{цм}}/V_3 = 1,3-1,4$, толщина прослойки $\delta_{\text{цм}} = 48,6-50,8$ мкм, $\delta_{\text{цм}}/d_{\text{ср}} = 0,18-0,19$ (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Влияние состава цементной матрицы в мелкозернистых системах «цемент + заполнитель + модифицирующие добавки + вода»

Обозначение системы	Рецептурные параметры			Структурные параметры				Реологические характеристики			
	Вид заполнителя	Массовое соотношение Ц : З	Плотность упаковки заполнителя, %	$V_{\text{цм}}/V_3$	Толщина прослойки δ , мкм	Средний диаметр частиц заполнителя, мкм	$\delta_{\text{цм}}/d_{\text{ср}}$	Оценка предела пластичности $K_i(Q)$, кПа	Структурная прочность σ_0 , кПа	Пластическая прочность $\sigma_{пл}$, кПа	Относительные пластические деформации $\Delta_{пл}$, мм/мм
Ц-П-СП-МКЛ	Кварцевый песок	1 : 1,25	61,19	1,4	50,8	274	0,19	2,2	3,1	30,8	0,03
Ц-П-СП-ТКПФ-КМ				1,4	50,6		0,18	2,4	3,1	31,3	0,04
Цб-П-СП-МКЛ				1,3	48,7		0,18	3,4	0,4	45,9	0,07
Цб-П-СП-ТКПФ-КМ				1,3	48,6		0,18	3,4	0,4	43,8	0,08

На рисунках 3.9 и 3.10 представлены кривые $F^* = f(h_i/R)$ для цементных матриц и модельных систем «цемент СЕМ I 42,5R + заполнитель + модифицирующие добавки + вода», «цемент СЕМ I 52,5R + заполнитель + модифицирующие добавки + вода».

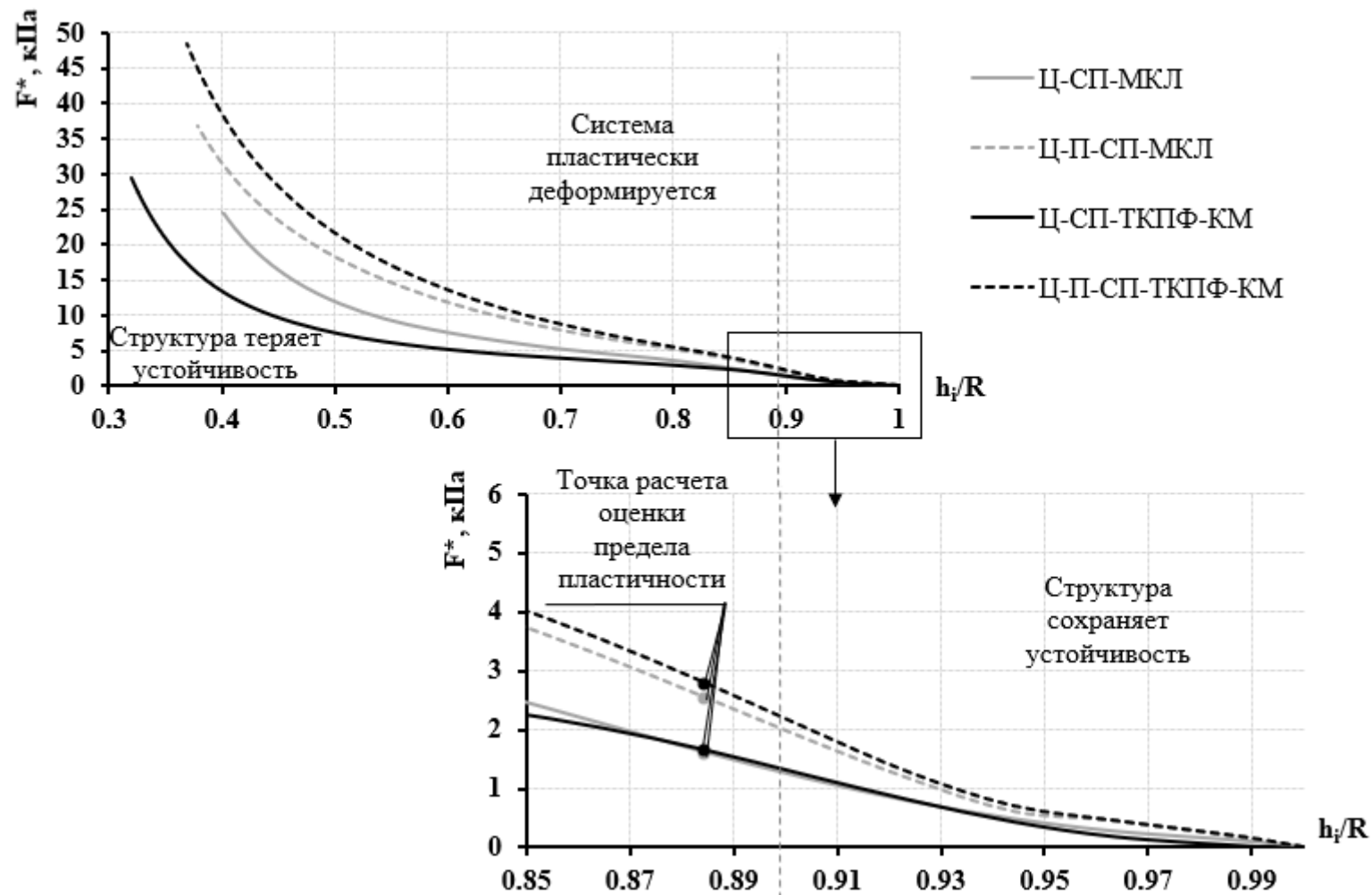


Рисунок 3.9 – Экспериментальные кривые $F^*=f(h_i/R)$ для цементных матриц «цемент СЕМ I 42,5R + модифицирующие добавки + вода» и модельных систем «цемент СЕМ I 42,5R + заполнитель + модифицирующие добавки + вода»

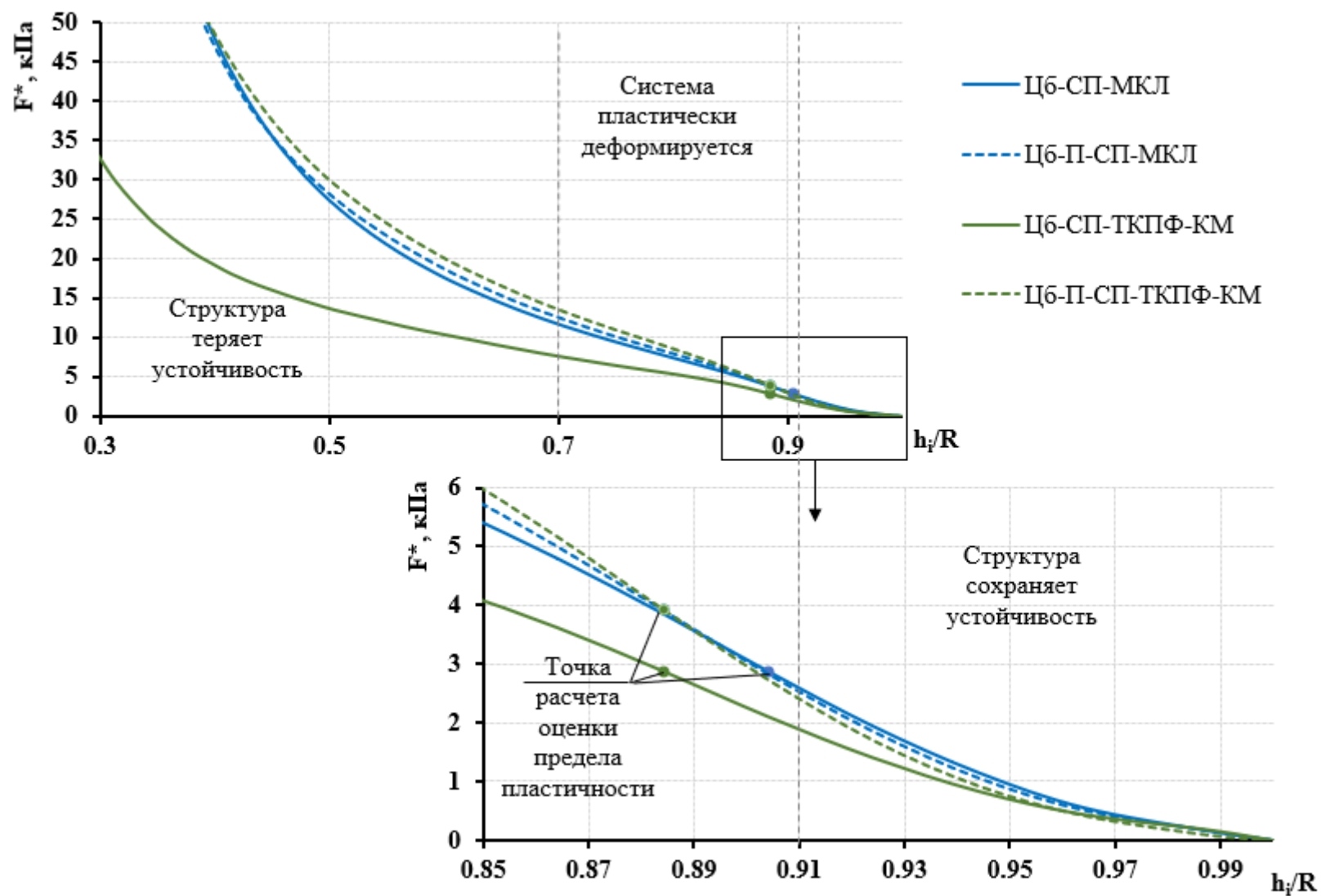


Рисунок 3.10 – Экспериментальные кривые $F^*=f(h_i/R)$ для цементных матриц «цемент СЕМ I 52,5R + модифицирующие добавки + вода» и модельных систем «цемент СЕМ I 52,5R + заполнитель + модифицирующие добавки + вода»

Согласно полученным данным (см. рис. 3.9), реологическое поведение исследуемых модельных систем на основе СЕМ I 42,5R и соответствующих цементных матриц имеет одинаковый тип, характеризуемый как пластичный, что определяет способность смеси к экструдированию без нарушения сплошности слоя. Полученные кривые имеют плавный характер и отвечают типу, имеющему условно горизонтальный участок пластического деформирования в диапазоне $h_i/R = 0,7-0,9$. При этом оценка предела пластичности $K_i(I)$ для систем на сером цементе с заполнителем находится в узком диапазоне 2,2-2,4 кПа, что на 50-60 % превышает этот же показатель для соответствующей цементной матрицы

Рассмотренные системы на белом цементе также способны к пластическому течению, однако оценка предела пластичности для мелкозернистых смесей $K_i(I) = 3,4$ кПа, что на 40 % превышает показатели цементных матриц, данные значения оценки предела пластичности (более 2,5 кПа) ограничивают применение данных смесей в технологии строительной печати. Получены результаты оценки комплексного влияния вида вяжущего и модификатора вязкости метакеолина на особые технологические свойства смесей для 3D-печати (опубликовано в работе [142]).

На рисунке 3.11 приведены кривые «относительные деформации – напряжение» для мелкозернистых модельных систем и соответствующих им цементных матриц. На всех полученных кривых, как и кривых для первых модельных систем, можно выделить зону пластического деформирования и трещинообразования, развивающегося после возникновения первой трещины.

Модельные системы, у которых в качестве основного вяжущего компонента был использован серый цемент, обладают высокими показателями структурной прочности $\sigma_0 = 3,1$ кПа, что почти в 8 раз превышает данный показатель для систем на белом цементе (опубликовано в работе [141]). Состав цементной матрицы влияет на реологическое поведение мелкозернистого цементного раствора по показателям структурной прочности.

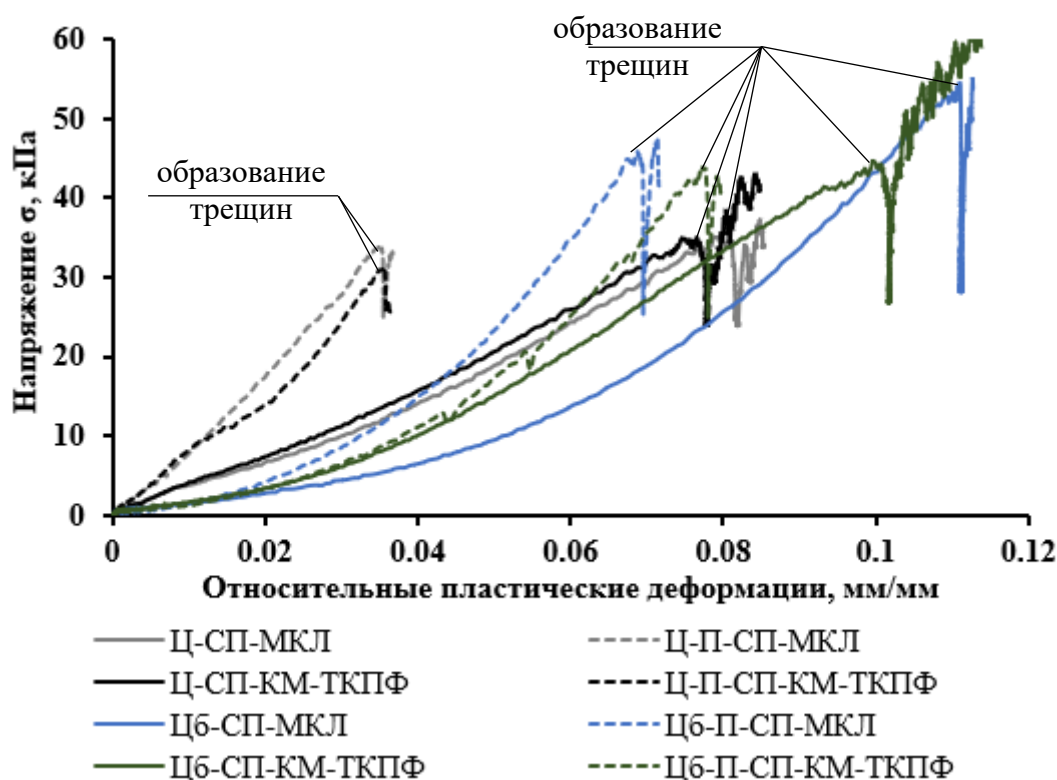


Рисунок 3.11 – Приведенные экспериментальные кривые «относительные деформации – напряжение» для цементных матриц «цемент СЕМ I 42,5R + модифицирующие добавки + вода» и модельных систем «цемент СЕМ I 42,5R + заполнитель + модифицирующие добавки + вода»

Установлено влияние применяемых модификаторов вязкости (метакаолин, тетракалий пирофосфат + камедь ксантановая) на кинетику раннего структурообразования (схватывания) и твердения (набор прочности) смесей и композитов (опубликовано в работах [80, 143]). Для зоны пластического деформирования характерно деформирование без разрушения при развитии пластических деформаций до момента образования трещин, после которых происходит резкое падение напряжений, образование микротрещин и наступает полное разрушение структуры. Способность смеси воспринимать нагрузку при пластическом деформировании, до образования трещин определяется пластической прочностью и относительными пластическими деформациями. Для всех модельных систем показатели пластической прочности превышают 30 кПа, что обеспечивает возможность нагружения свежеотформованного слоя вышележащими.

Системы на белом цементе в целом отличаются меньшей формоустойчивостью. По сравнению с модельными системами на сером цементе, системы на белом

цементе более длительное время подвергаются деформации без разрушения, наблюдается увеличение периода пластического деформирования, и разрушение наступает при относительных пластических деформациях 0,7-0,8 мм/мм, что почти в 2 раза превышает данный показатель для систем на сером цементе.

Состав цементной матрицы влияет на процессы структурообразования и твердения, что было установлено в ранее проведенных исследованиях, проведенных в рамках выполнения Государственного задания Минобрнауки РФ по проекту 7.10781.2018/11.12 [144]. Установлена количественная взаимосвязь прочности мелкозернистого бетона для 3D-печати и цементной матрицы аналогичного состава по виду и дозировкам модификатора вязкости и пластификатора. Если цементная матрица и мелкозернистая смесь имеют аналогичные реологические характеристики, то прочность бетона закономерно определяется содержанием заполнителя. В рассматриваемом диапазоне массовых соотношений Ц : З = 1 : 1 – 1 : 1,25 прочность бетона составляет 70-80% от прочности цементной матрицы и зависит от вида заполнителя.

Контроль прочности изученных систем подтвердил полученные ранее соотношения прочностных характеристик цементного камня и бетона с аналогичным составом цементной матрицы (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Прочностные характеристики цементных композитов для 3D-печати

Обозначение системы	Предел прочности при сжатии, МПа				
	1 сут	3 сут	7 сут	14 сут	28 сут
Цементный камень					
Ц -СП-МКЛ	34,1	–	–	–	77,2
Ц -СП-ТКПФ-КМ	8,2	–	–	–	75,7
Цб -СП-МКЛ	29,1	–	–	–	81,1
Цб -СП-ТКПФ-КМ	22,4	–	–	–	72,1
Мелкозернистый бетон					
Ц-П-СП-МКЛ	31,0	43,1	55,3	60,6	62,7
Ц-П-СП-ТКПФ-КМ	7,3	39,9	49,9	49,7	58,3
Цб-П-СП-МКЛ	37,0	50,6	55,5	65,4	75,0
Цб-П-СП-ТКПФ-КМ	18,2	37,7	51,0	55,3	56,6

Поэтому соотношение (3.4) может быть принято проектировании состава мелкозернистого бетона для 3D-печати.

$$R_6 = 0,75 R_{цк} \quad (3.4)$$

Таким образом, при проектировании составов мелкозернистых бетонов должны учитываться следующие характеристики цементной матрицы:

1) пластическая прочность должна находиться в диапазоне 0,7-1,7 кПа, что соответствует реологическим характеристикам по оценке предела пластичности, находящегося в том же диапазоне значений.

2) прочность цементного камня, для принимаемой матрицы, должна быть не менее, чем на 25 % выше задаваемой прочности мелкозернистого бетона.

3.3 Разработка предложений по методике и алгоритму проектирования составов мелкозернистых бетонов для 3D-печати

3.3.1 Исходные положения для разработки методики проектирования

На основании полученных экспериментальных данных для проектирования принимается, что способность смесей к пластическому течению, для обеспечения экструдированности в процессе печати, главным образом зависит от толщины прослойки цементной матрицы между частицами заполнителя. Упаковка частиц заполнителя и вид матрицы, связывающей частицы, влияют на структурную прочность и относительные деформации. Поэтому, проектирование состава основывается на применении в расчете следующих структурных параметров: объем цементной матрицы ($V_{цм}$), толщина прослойки цементной матрицы, объем заполнителя (V_z), объем межзерновых пустот ($V_{мп}$), плотности упаковки (ϕ) и диаметр частиц заполнителя (d_i – диаметр частиц заданной фракции, $d_{ср}$ – средний диаметр частиц, с

учетом количества частиц заданной фракции N_i). В качестве критериального параметра структуры принимается отношение толщины прослойки цементной матрицы к среднему диаметру частиц заполнителя $\delta_{\text{цм}}/d_{\text{ср}} = 0,15-0,21$.

При разработке предложений по методике проектирования составов также принимается допущение, что форма частиц заполнителя приближена к шару, а плотность упаковки частиц не меняется при введении цементной матрицы.

Объем бетона представляется в виде двухкомпонентной системы:

$$V_{\text{мз бет}} = V_{\text{цм}} + V_3 \quad (3.5)$$

Объем частиц заполнителя может быть представлен как сумма объемов всех частиц заданного диаметра:

$$V_3 = \frac{\pi \cdot \sum_i N_i \cdot d_i^3}{6} \quad (3.6)$$

При этом вид упаковки частиц заполнителя можно охарактеризовать величиной плотности упаковки φ , определяемой по стандартной методике ГОСТ через истинную и насыпную плотности заполнителя или через отношение объемов:

$$\frac{V_3}{V_3 + V_{\text{мзп}}} = \varphi \quad (3.7)$$

В тоже время, основной объем матрицы состоит из объема, необходимого для заполнения межзерновой пустотности в исходной структуре сложения частиц заполнителя, и объема для их раздвижки и создания вязко-пластичной прослойки $\delta_{\text{цм}}$ между частицами заполнителя, заполнения дополнительного объема пустоты между частицами с учетом дополнительной толщины прослойки (рассматриваются частицы с увеличенным диаметром $d_i + \delta_{\text{цм}}$):

$$V_{\text{цм}} = V_{\text{мзп}} + V_{\text{пр}} + V_{\text{пустоты от прослоек}} \quad (3.8)$$

С учетом допущения, что в структуре сложения частиц заполнителя вязко-пластичная прослойка имеет одинаковую толщину и не зависит от диаметра частиц, то объем матрицы, необходимый для создания таких прослоек ($\delta_{\text{цм}}$) можно представить как:

$$V_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i \cdot \pi \cdot (d_i + \delta_{\text{цм}})^3}{6 \cdot d_i^3} \quad (3.9)$$

Объем дополнительной пустоты от объема прослоек с учетом сохранности плотности упаковки частиц φ равен:

$$V_{\text{пустоты от прослоек}} = V_{\text{пр}} \cdot \frac{1 - \varphi}{\varphi} \quad (3.10)$$

Тогда, на основании представленных закономерностей, в зависимости от фракционного состава и плотности упаковки заполнителя, можно построить аналитическую зависимость $V_{\text{цм}}/V_3$ в зависимости от величины получаемой прослойки.

Если частицы заполнителя сохраняют упаковку в структуре бетона, равномерно удаляясь на одинаковое расстояние, равное $\delta_{\text{цм}}$, то минимальное количество матрицы, необходимое для заполнения межзерновой пустотности

$$V_{\text{цм min}} = V_{\text{мзп}} = V_3 \cdot \frac{1 - \varphi}{\varphi} \quad (3.11)$$

Так как фракционный состав заполнителя определяется экспериментально, то для каждой i -ой фракции можно определить количество частиц:

$$N_i = \frac{a_i \cdot V_3}{\pi \cdot d_i^3 / 6} \quad (3.12)$$

где a_i – доля остатка на сите по массе, %.

С учетом этого, расход цемента на создание прослоек составит:

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{зап}} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{a_i \cdot (d_i + \delta_{\text{цм}})^3}{d_i^3} - 1 \right) \quad (3.13)$$

Объем цемента на заполнение исходной межзерновой пустотности и дополнительного объема, образовавшейся при увеличении диаметра частиц на величину $\delta_{\text{цм}}$, определяется по соотношению:

$$V_{\text{мзп}} + V_{\text{пустоты от прослоек}} = V_3 \cdot \frac{1 - \varphi}{\varphi} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i \cdot (d_i + \delta_{\text{цм}})^3}{d_i^3} \quad (3.14)$$

Тогда отношение объемов можно представить следующим образом:

$$V_{\text{цм}} / V_3 = \left(\frac{1}{\varphi} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i \cdot (d_i + \delta_{\text{цм}})^3}{d_i^3} \right) - 1 \quad (3.15)$$

В расчетах принимается экспериментально установленный диапазон варьирования толщины прослойки цементной матрицы: $0,15 \cdot d_{\text{ср}} \leq \delta_{\text{цм}} \leq 0,21 \cdot d_{\text{ср}}$.

Для заполнителей с различным фракционным составом, но сопоставимыми значениями экспериментально определенной плотности упаковки частиц были рассчитаны средние диаметры частиц (таблица 3.6). По формулам 3.6-3.15 рассчитаны объемные отношения матрицы к частицам заполнителя. Для каждого фракционного состава заполнителя на рисунке 3.12 представлены зависимости прогнозирования изменения $V_{\text{цм}}/V_3$ от $\delta_{\text{цм}}/d_{\text{ср}}$. Пользуясь аналогичной графической зависимо-

стью, полученной для известного фракционного состава и плотности упаковки частиц, рассчитанном среднем диаметре частиц заполнителя, можно произвести необходимый подбор объема матрицы, требуемый для создания вязко-пластичной прослойки $\delta_{\text{цм}}$.

Таблица 3.6 – Фракционный состав, плотность упаковки частиц и расчетные характеристики для рассматриваемого заполнителя

Средний диаметр частиц, мм	Остатки по массе, %			Плотность упаковки частиц, %
	1,25-0,63	0,63-0,315	0,315-0,16	
0,25	20	20	60	61,43
0,26	10	40	50	62,32
0,27	20	40	40	61,21
0,28	40	30	30	61,19
0,29	40	40	20	61,86
0,30	60	20	20	61,55

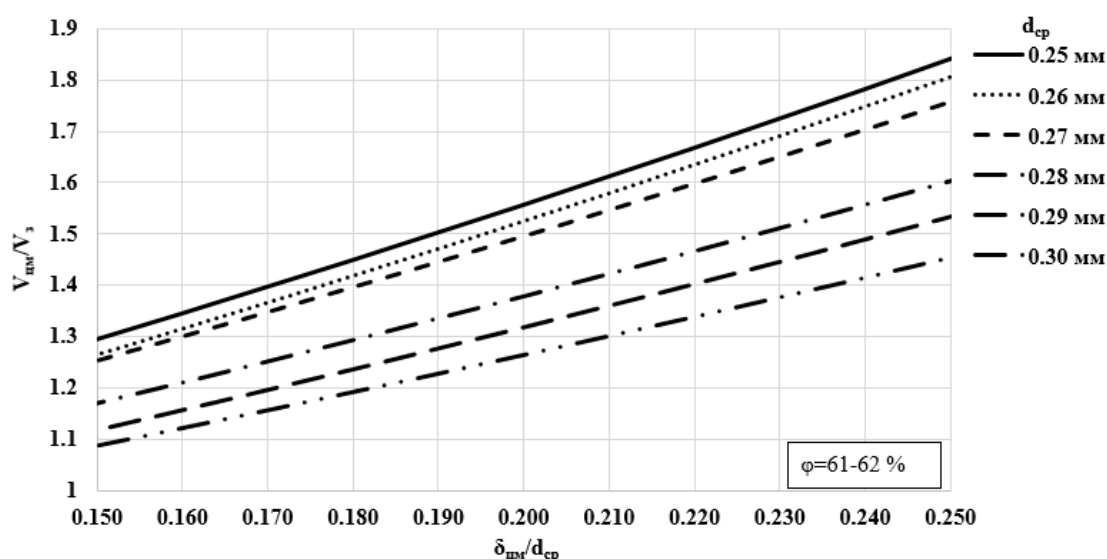


Рисунок 3.12 – Данные для проектирования состава мелкозернистого бетона для 3D-печати

Следовательно, при конструировании структуры и проектировании составов мелкозернистого бетона для 3D-печати необходимо учитывать следующее:

1. соотношение компонентов структуры «матрица – заполнитель» должно обеспечивать взаимодействие частиц заполнителя через прослойки матрицы;

2. толщина прослойки матрицы определяется по критерию пригодности к печати.

Для этого необходимо определить и назначить соответствующие параметры объемов компонентов структуры, диаметра и плотности упаковки частиц заполнителя, а также толщину прослойки между частицами заполнителя (или отношения прослойки к среднему диаметру частиц в заданном заполнителе).

Результаты, представленные в диссертационном исследовании (см. разд. 3.1-3.2), однозначно свидетельствуют о том, что чем толще прослойка матрицы между частицами заполнителя, тем меньше роль заполнителя в структуре смеси, характер поведения в данном случае полностью зависит только от исходных свойств матрицы. И в тоже время, при тонких прослойках невозможно получить такую структуру смеси, которая будет пригодна по технологическим параметрам к процессу печати. Следовательно, при конструировании мелкозернистого бетона, пригодного к применению в области аддитивных технологий, необходимо стремиться к формированию наиболее «тонких» прослоек матрицы между частицами полифракционных заполнителей, обеспечивающих технологические параметры, получаемых мелкозернистых бетонов. Как было установлено (см. разд. 3.1), технологически пригодными свойствами обладает смесь, если соотношение толщины прослойки и среднего размера включений в ее структуре удовлетворяет условию: $\delta_{\text{цм}}/d_{\text{ср}} = 0,15-0,21$.

На основании изложенных подходов и полученных экспериментально статистических зависимостей «состав – структура – свойства» мелкозернистых смесей для 3D-печати разработана методика и алгоритм проектирования составов.

3.3.2 Методика проектирования составов мелкозернистых бетонов для 3D-печати

Задание на проектирование должно включать целевые значения технологических характеристик смесей и требования по прочности бетона.

Проектирование состава включает следующие этапы.

1. Экспериментально определяются характеристики заполнителя – фракционный состав, насыпная и истинная плотность. Заполнитель должен быть представлен не менее чем тремя стандартными фракциями (0,16-0,315 мм, 0,315-0,63 мм, 0,63-1,25 мм, 1,25-2,5 мм и 2,5-5 мм). Если содержание фракций менее трех и/или доля одной из фракций составляет более 75 % от общей массы, то производится корректировка фракционного состава заполнителя для достижения его полифракционного состава, для обеспечения устойчивого сложения частиц. После корректировки фракционного состава заполнителя производят повторное определение насыпной плотности.

2. Осуществляется подбор состава цементной матрицы, обеспечивающего требуемые технологические характеристики и заданные прочностные показатели.

Для обеспечения технологических характеристик смесей в составе производят подбор видов и дозировок пластификаторов и модификаторов вязкости. При подборе номинального состава цементной матрицы предварительно расход пластифицирующей добавки назначают 1 %, добавок, повышающих вязкость – 2 %, добавок электролитов – 0,4 % от массы цемента.

Водоцементное отношение (В/Ц) назначают: 0,25 – в составах без наполнителей, 0,28 – в составах с наполнителями.

Для обеспечения заданной прочности производят подбор состава цементной матрицы по массовому соотношению цемента и минеральных наполнителей с размером частиц не более 0,1 мм. Массовую долю наполнителей принимают исходя из условия $\text{Ц} : \text{Н} \leq 3 : 2$.

Производится экспериментальная оценка номинального состава по пластичности. Пластичность смеси, полученной по подобранному номинальному составу, оценивают пенетрометром, полученные значения должны удовлетворять диапазон 0,1-1,1 кгс/см², или пластометром – 0,7-1,7 кПа.

Если не обеспечена пластичность то, производят корректировку состава:

- если матрица жесткая, пластическая прочность превышает значения 1,7 кПа или 1,1 кгс/см² – требуется снизить расход модификаторов вязкости и увеличить В/Ц;

- если матрица подвижная, пластическая прочность не достигает значения 0,7 кПа или 0,1 кгс/см² – требуется снизить расход пластификатора и В/Ц.

После корректировки производится повторная оценка пригодности смеси откорректированного состава по технологическим свойствам к технологии строительной 3D-печати.

После обеспечения рационального сочетания технологических характеристик смеси изготавливают стандартные образцы кубы размером 50 × 50 × 50 мм, которые испытывают на сжатие в возрасте 1 сутки, прочность цементного камня должна быть на 25-30 % выше заданной прочности проектируемого мелкозернистого бетона.

Если прочность не обеспечена, то необходимо произвести корректировку расхода минеральной добавки и повторно оценить технологические характеристики смеси и прочностные свойства композита.

3. Для подобранного заполнителя рассчитываются средний диаметр частиц (d_{cp}) в соответствии с фракционным составом, при этом размер частиц каждой фракции принимается как среднее значение между размером ячеек использованных стандартных сит, и плотность упаковки частиц (ϕ) заполнителя определяется как отношение экспериментально определенной истинной плотности к насыпной:

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i / d_i^2}{\sum_{i=1}^n a_i / d_i^3} \quad (3.16)$$

где a_i – доля остатка на i -ом сите по массе, d_i – принятый диаметр i -ой фракции частиц заполнителя, как среднее значение между размером ячеек использованных стандартных сит, м.

4. На основании принятого ограничения ($\delta_{\text{цм}}/d_{\text{ср}} = 0,15-0,21$) определяется значение толщины прослойки цементной матрицы между частицами заполнителя ($\delta_{\text{цм}}$) и выполняется проверка: принятая толщина прослойки не менее максимального размера зерна цемента.

5. В зависимости от принятой толщины прослойки цементной матрицы $\delta_{\text{цм}}$, для каждой фракции заполнителя определяется коэффициент увеличения объема:

$$f_i = \sum_{i=1}^n \frac{(d_i + \delta_{\text{цм}})^3}{d_i^3} \quad (3.17)$$

6. Выполняется расчет соотношения объемных долей цементной матрицы и заполнителя:

$$V_{\text{цм}}/V_3 = \left(\frac{1}{\varphi} \cdot \sum_{i=1}^n a_i \cdot f_i\right) - 1 \quad (3.18)$$

7. С учетом конкретной средней плотности рекомендуемой матрицы ($\rho_{\text{цм}}^{\text{ср}}$) и истинной плотности используемого заполнителя ($\rho_3^{\text{ист}}$), определяются массовые соотношения цементной матрицы и заполнителя:

$$m_{\text{цм}}/m_{\text{зап}} = \frac{\rho_{\text{цм}}^{\text{ср}}}{\rho_3^{\text{ист}}} \cdot \frac{V_{\text{цм}}}{V_3} \quad (3.19)$$

8. Выполняется проверка подобранного состава смеси по пластической прочности $P_{\text{пл}} = 1,0-2,5$ кПа.

9. Если не обеспечена требуемая пластичность смеси, необходимо увеличить толщину прослойки в заданном диапазоне варьирования принятого ограничения ($\delta_{\text{цм}}/d_{\text{ср}} = 0,15-0,21$).

10. В зависимости от технологических возможностей рассматриваемого принтера регулированием В/Ц можно обеспечить получение высокотекучих смесей ($P_{пл} = 1,0-1,7$ кПа) и низкотекучих смесей ($P_{пл} = 1,8-2,5$ кПа).

11. Выполняется проверка прочности бетона подобранного состава на соответствие заданной прочности. Если прочность ниже заданной, уменьшают массовую долю наполнителей (Ц : Н).

Предложенная методика включена в виде правил подбора состава в разработанный «Технологический регламент производства сухих смесей строительных на цементном вяжущем для строительной 3D-печати» (Приложение Г) и апробирована при производстве партии сухих строительных смесей на заводе ООО «СТРОЙСАНТЕХМОНТАЖ» (Приложение Д).

Алгоритм подбора состава представлен на рисунке 3.13.

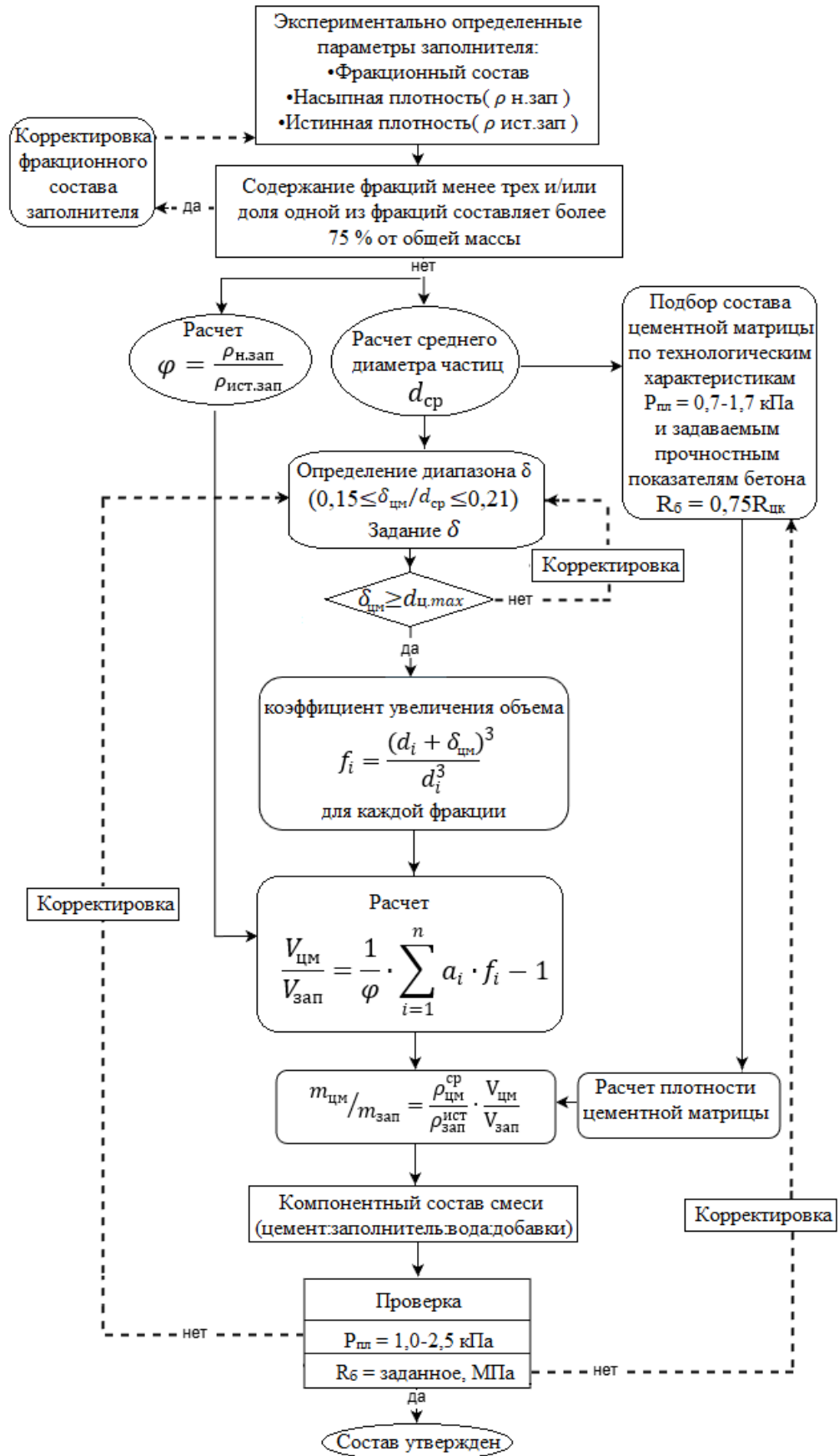


Рисунок 3.13 – Алгоритм проектирования состава смеси мелкозернистого бетона

3.4 Выводы по главе 3

1. На основании исследования реологического поведения мелкозернистых цементных смесей установлено, что рациональными реологическими характеристиками, обеспечивающими экструдирруемость по показателю оценки предела пластичности и формоустойчивость по показателю структурной прочности, обладают системы на заполнителе полифракционного состава. Смеси, изготовленные с использованием заполнителя монофракционного состава, характеризуются как жесткие по типу реологического поведения, демонстрируют неспособность к вязкопластическому течению с неразрушенной структурой, что определяет их технологическую непригодность к печати из-за невозможности формирования бездефектного слоя в процессе экструзии.

2. Определены исходные граничные требования к характеристикам смесей, которые обеспечивают экструдирруемость и формоустойчивость. К реологическим характеристикам отнесены: значения оценки предела пластичности $K_i(I) = 1,0-2,5$ кПа, структурной прочности $\sigma_0 = 1-3$ кПа, относительных пластических деформаций слоя $\Delta_{пл} \leq 0,1$ мм/мм; к технологическим – пластическая прочность $P_{пл} = 1,0-2,5$ кПа. Для обеспечения данных характеристик установлено, что концентрация заполнителя в составе смеси должна находиться в диапазоне 110-140 % от массы цемента. При этом заполнитель должен быть представлен не менее чем тремя стандартными фракциями, содержание каждой фракции – не более 75 % от его общей массы.

3. Экспериментально установлено, что реологические и технологические характеристики мелкозернистой цементной смеси определяются реологическим поведением цементной матрицы. Для обеспечения пластичности и формоустойчивости модели реологического поведения мелкозернистой смеси и цементной матрицы должны быть сходными. Для реализации данного условия предложен критериальный параметр и диапазон его значений, а именно, отношение толщины прослойки цементной матрицы к диаметру частиц заполнителя $\delta_{цм}/d_{ср} = 0,15-0,21$.

4. Для проектирования состава бетона получены следующие экспериментально-статистические зависимости:

- «реологические характеристики смеси – отношение толщины прослойки цементной матрицы к диаметру частиц заполнителя» ($K_i(I) = f(\delta_{цм}/d_{ср})$, $\sigma_0 = f(\delta_{цм}/d_{ср})$, $\sigma_{пл} = f(\delta_{цм}/d_{ср})$, $\Delta_{пл} = f(\delta_{цм}/d_{ср})$);
- «отношение толщины прослойки цементной матрицы к диаметру частиц заполнителя – параметры состава».

На основании данных зависимостей определены граничные значения варьирования объемных долей цементной матрицы и заполнителя в диапазоне 1,2-1,5; массовых соотношений заполнителя и цемента – 1,1-1,4.

5. Разработана методика и алгоритм проектирования составов мелкозернистых бетонов для 3D-печати, включающий следующие шаги:

- экспериментальное определение характеристик исходного заполнителя (фракционный состав, истинная и насыпная плотности); корректировка состава заполнителя, если содержание фракций менее трех и/или доля одной из фракций составляет более 75 % от общей массы;
- подбор состава цементной матрицы по технологическим характеристикам (пластическая прочность 0,7-1,7 кПа) и задаваемым прочностным показателям бетона (75 % от прочности цементной матрицы).
- расчет характеристик заполнителя (средний диаметр частиц и плотность упаковки частиц);
- определение требуемой толщины прослойки цементной матрицы на основании принятого ограничения параметров структуры смеси ($\delta_{цм}/d_{ср} = 0,15-0,21$);
- определение объемного соотношения элементов структуры смеси и расчет массовых соотношений цементной матрицы и заполнителя;
- экспериментальное подтверждение технологических характеристик мелкозернистой смеси, изготовленной на основании подобранного состава (пластическая прочность в диапазоне 1,0-2,5 кПа);
- проверка прочности бетона на соответствие заданной.

4 РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ДЕКОРАТИВНЫХ БЕТОНОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

В данной главе представлены результаты отработки и апробации разработанной методики при проектировании составов архитектурных бетонов для 3D-печати, к которым дополнительно предъявляются требования декоративности и физико-климатической стойкости.

Эффект декоративности достигался за счет применения:

- цветных полифракционных заполнителей для получения текстур, имитирующих природных камень;
- пигментов в малых дозировках для достижения эффекта окрашивания цементной матрицы.

4.1 Проектирование составов декоративных бетонов

Для проектирования составов мелкозернистых смесей с текстурой искусственного камня как двухкомпонентной системы «цементная матрица – заполнитель» были приняты следующие виды заполнителей:

- гранит-орех с размером зерен $D = 0,63-2,5$ мм;
- сланец терракотовый с размером зерен $D = 1,25-5$ мм;
- змеевик с размером зерен $D = 2,5-5$ мм.

При проведении экспериментальных исследований было запроектировано четыре состава декоративных бетонов ЦМ – Песок, ЦМ – Гранит Орех, ЦМ – Пигмент красный – Гранит Орех – Сланец, ЦМ – Пигмент зеленый – Гранит Орех – Змеевик. Основной состав цементной матрицы (ЦМ) принимался постоянным: цемент белый СЕМ I 52,5R, суперпластификатор, камедь, жидкое стекло, полипропиленовая фибра, В/Ц = 0,32-0,33, характеристики компонентов матрицы (см. табл. 2.1).

Предварительно перед началом проектирования было разработано задание на проектирование декоративного бетона, содержащее следующие требования:

1. Назначение смесей – для изготовления декоративных уличных изделий, полученных методом строительной 3D-печати.
2. Технологические требования к бетонным смесям:
 - пластическая прочность $R_{пл} = 1,0-2,5$ кПа;
 - сохранность свойств смеси не менее 30 мин, начало схватывания смеси не ранее 60 мин.
3. Условия твердения – естественные.
4. Проектные требования к бетону:
 - прочность получаемого композита не менее 30 кПа для обеспечения транспортирования изделия в первые сутки и получения антивандальных свойств слоистых композитов;
 - величина эксплуатационного водопоглощения не превышающая 3 %, для обеспечения возможности эксплуатации изделий на открытом воздухе;
 - морозостойкость не менее 200 циклов для обеспечения эксплуатации изделий при различных погодных условиях.
5. Характеристики составляющих бетона.
 - 5.1. Цемент – белый цемент CEM I 52,5R, производства Турция.
 - 5.2. Заполнитель – природные заполнители с размерами зерен 0,16-5 мм.
 - 5.3. Пластифицирующие добавки – суперпластификатор Sika[®] ViscoCrete[®]20HE.
 - 5.4. Модифицирующие добавки – камедь ксантановая FUFENG[®]80.
 - 5.5. Добавка электролит – жидкое стекло техническое ГОСТ 13078-81.
 - 5.6. Добавки пигменты – пигменты на основе Fe_2O_3 : красный (TP-303), производство Чехия, и зеленый Deqing tongchem CO, производство Китай.
 - 5.7. Фибра полипропиленовая – $l = 12$ мм.
6. Параметры оптимизации. В качестве критериев оптимизации принять технологическую характеристику бетона – пластическая прочность $R_{пл} = 1,0-2,5$ кПа.

На основании данного задания на подбор состава декоративного бетона и методики проектирования, предложенной в разделе 3.3 главы 3, были запроектированы четыре состава декоративного бетона.

На первом этапе, было принято сочетание дозировок заполнителей, для имитации различных текстур природных материалов: белый кварц, гранит, туф или красный мрамор, зеленый гранит. Затем экспериментально определены их фракционный состав, насыпная и истинная плотность (таблица 4.1). Все предложенные заполнители представлены набором из трех фракций, при этом содержание каждой из них не превышает 75 %.

Таблица 4.1 – Характеристика применяемых заполнителей

Вид заполнителя	Имитируемая текстура	Остатки на ситах, %					Плотность упаковки частиц φ , %	$d_{ср}$, мм	Истинная плотность, $кг/м^3$	Насыпная плотность, $кг/м^3$
		0,16 -	0,315 -	0,63 -	1,25 -	2,5 -				
		0,315	0,63	1,25	2,5	5				
Песок	белый кварц	37,5	49,3	13,2	-	-	61,2	0,27	2 650	1 620
Гранит Орех	белый гранит	-	-	20,2	13,7	66,1	57,6	1,14	2 610	1 500
Гранит Орех + Сланец (4 : 1)	туф (красный мрамор)	-	-	16,6	14,5	68,9	54,9	1,20	2 590	1 420
Гранит Орех + Змеевик (4 : 1)	зеленый гранит	-	-	16,0	10,4	73,6	54,4	1,18	2 620	1 420

На втором этапе, произведен подбор состава цементной матрицы на основе компонентов, указанных в задании на проектирование и с учетом назначения бетона. Состав цементной матрицы окрашивают для усиления эстетического эффекта и придания большей схожести с имитируемыми текстурами природных материалов (таблица 4.2).

Для используемых цементных матриц обеспечены следующие характеристики пластической прочности мелкозернистой смеси $R_{пл} = 1,2-1,7$ кПа, при этом цементная матрица имела значения пластической прочности: без пигментов – 1,2 кПа, с красным пигментом – 1,7 кПа, с зеленым пигментом – 1,3 кПа.

Таблица 4.2 – Составы цементной матрицы

Вид цементной матрицы	Вязущее	В/Ц	Суперпластификатор, % от массы цемента	Добавки, % от массы цемента				Средняя плотность матрицы, кг/м ³
				камень	жидкое стекло	пигмент	фибра	
ЦМ	цемент белый	0,27	1,2	0,2	0,2	-	0,5	2 065
ЦМ – Пигмент	CEM I 52,5R	0,27		0,2	0,2	0,2	0,5	2 040

На третьем этапе, для всех принятых видов заполнителей рассчитаны средний диаметр частиц (d_{cp}) в соответствии с фракционным составом и плотность упаковки частиц (ϕ) (см. табл. 4.1).

На основании принятого ограничения ($\delta_{цм}/d_{cp} = 0,15-0,21$), на четвертом этапе для каждого заполнителя в зависимости от среднего диаметра его частиц был определен диапазон варьирования толщины прослойки цементной матрицы ($\delta_{цм}$) и рассчитаны объемные соотношения цементной матрицы и заполнителя ($V_{цм}/V_3$) при принятом значении $\delta_{цм}$ (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Структурные параметры для проектирования составов смесей

Наименование состава	Расчетный диапазон $\delta_{цм}$, мм	Принятое $\delta_{цм}$, мм	$\delta_{цм}/d_{cp}$	$V_{цм}/V_3$
ЦМ – Песок	0,04 – 0,06	0,05	0,185	1,40
ЦМ – Гранит Орех	0,17 – 0,24	0,24	0,210	1,38
ЦМ – Пигмент красный – Гранит Орех – Сланец	0,10 – 0,25	0,22	0,183	1,46
ЦМ – Пигмент зеленый – Гранит Орех – Змеевик	0,18 – 0,25	0,23	0,195	1,42

На пятом этапе, были рассчитаны массовые доли компонентов смеси с учетом истинных плотностей применяемых компонентов цементной матрицы и заполнителей (таблица 4.4).

Для всех запроектированных составов смесей, была произведена оценка реологических и технологических параметров для подтверждения возможности их применения в технологии экструзионной безопалубочной печати.

Таблица 4.4 – Запроектированные составы смесей

Наименование состава	Массовые доли компонентов смеси, г						
	Заполнитель	Цементная матрица					
		Цемент	Вода	Суперпластификатор	Кальций	Жидкое стекло	Пигмент
ЦМ – Песок	1 000	816	261	9,8	1,6	1,6	-
ЦМ – Гранит Орех	1 000	816	261	9,8	1,6	1,6	-
ЦМ – Пигмент красный – Гранит Орех – Сланец	1 000	833	281	10,2	1,7	1,7	1,7
ЦМ – Пигмент зеленый – Гранит Орех – Змеевик	1 000	823	272	9,9	1,65	1,65	1,65

После экспериментальной корректировки составов бетонов по показателям технологичности были оценены физико-механические характеристики и показатели физико-климатической стойкости композитов, получаемых на основе запроектированных составов смесей.

4.2 Исследование реологических и технологических свойств декоративных цементных смесей для строительной 3D-печати

Реологическое поведение. На рисунке 4.1 представлены кривые зависимости приведенной нагрузки F^* от относительного изменения высоты образца h_i/R для запроектированных систем.

Реологическое поведение всех запроектированных цементных смесей соответствует пластичным системам. Полученные кривые имеют плавный характер, при этом значения оценки предела пластичности $K_i(I) = 1,2-2,4$ кПа (таблица 4.5), в узком диапазоне пластического деформирования систем $h_i/R = 0,85-0,90$ [145]. Данные значения оценки предела пластичности обеспечивают необходимую экструдированность при печати за счет достаточной пластичности и способности смеси к вязкопластическому течению без разрушения структуры под действием напряжений, возникающих при экструзии.

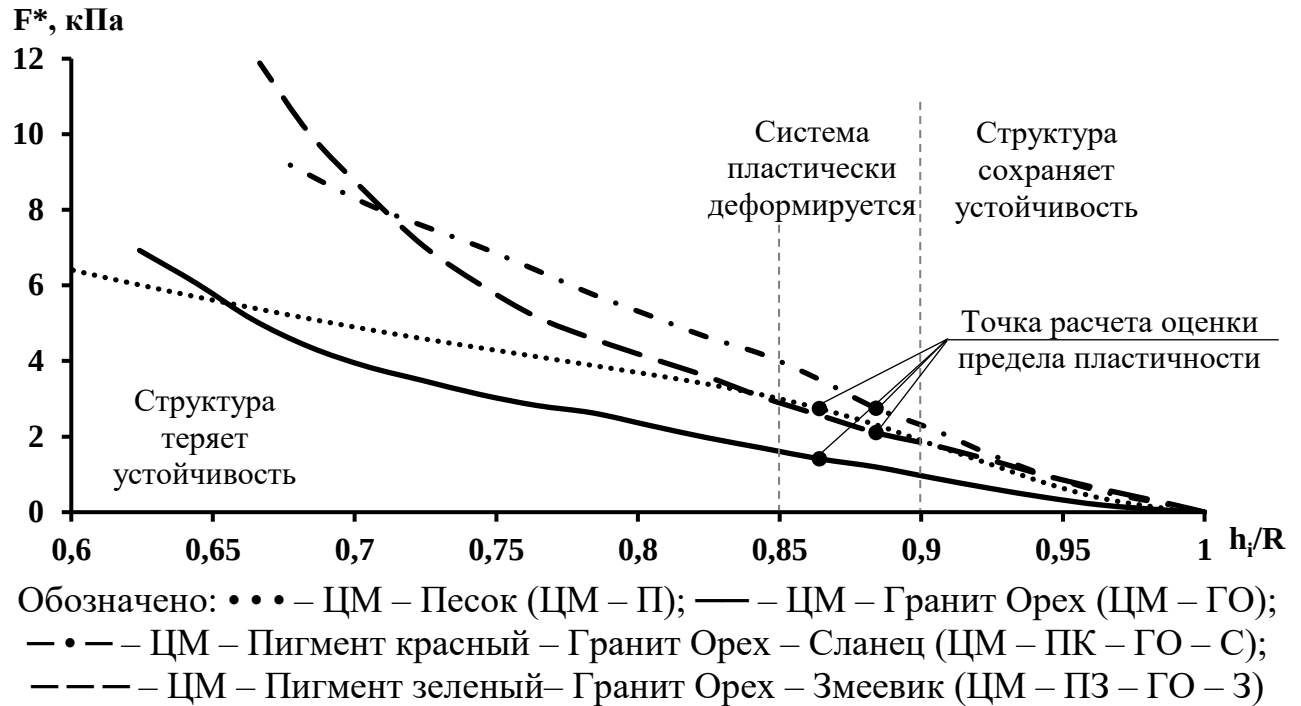


Рисунок 4.1 – Кривые зависимости приведенной нагрузки F^* от относительного изменения высоты образца h_i/R

Таблица 4.5 – Реологические и технологические характеристики декоративных цементных смесей

Наименование состава	Реологические характеристики				Технологическая характеристика – пластическая прочность, $P_{пл}$, кПа
	$K_i(I)$, кПа	σ_0 , кПа	$\sigma_{пл}$, кПа	$\Delta_{пл}$, мм/мм	
ЦМ – Песок	2,4	1,1	45,6	0,06	2,4
ЦМ – Гранит Орех	1,2	1,4	42,8	0,08	1,2
ЦМ – Пигмент красный – Гранит Орех – Сланец	2,4	1,9	42,0	0,05	2,4
ЦМ – Пигмент зеленый – Гранит Орех – Змеевик	1,7	2,4	35,1	0,05	1,7

При конструировании структур составов были приняты различные значения $\delta_{цм}/d_{ср}$, и как было доказано ранее, при увеличении значения структурного параметра, закономерно уменьшается значение оценки предела пластичности, т.е. система стремится к снижению своей жесткости и реологическим характеристикам, соответствующим цементной матрице. Например, для систем ЦМ – Песок и ЦМ – Гранит Орех, имеющих одинаковый состав и свойства цементной матрицы,

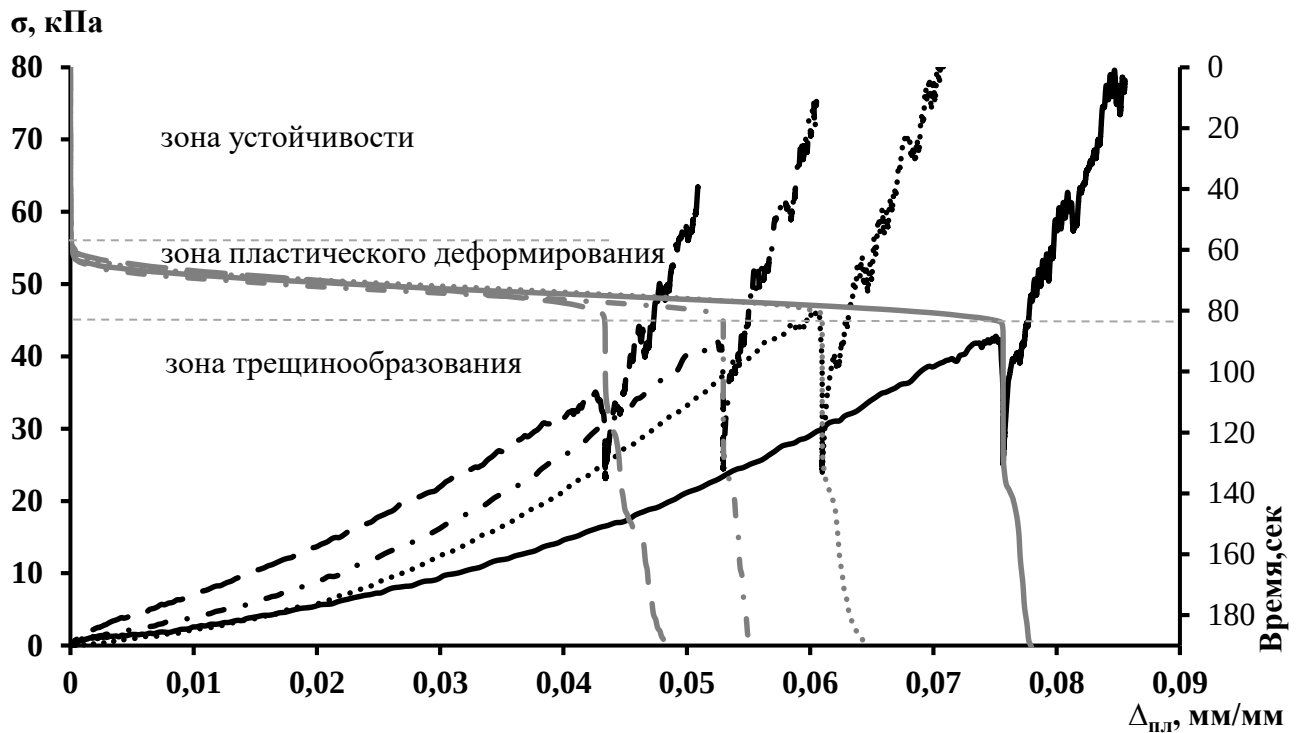
при меньшем значении $\delta_{цм}/d_{ср} = 0,185$ – $K_i(I) = 2,4$ кПа соответственно (система с песком), при увеличении структурного параметра $\delta_{цм}/d_{ср} = 0,210$ в случае системы с гранитом, значение оценки предела пластичности уменьшается до $K_i(I) = 1,2$ кПа. Также большая пластичность системы с гранитом может быть обусловлена особенностями его поверхности.

На рисунке 4.2 приведены кривые «относительные деформации – напряжение», «относительные деформации – время» для всех запроектированных составов смесей. Для всех полученных кривых выделяются характерные зоны деформирования: устойчивости, пластического деформирования, трещинообразования. Все системы обладают способностью воспринимать нагрузку без деформирования до достижения показателя структурной прочности $\sigma_0 = 1,1-2,4$ кПа (таблица 4.5), деформироваться без разрушения до достижения момента образования первых трещин, которому характерны значения пластической прочности $\sigma_{пл} = 35-46$ кПа при соответствующих значениях относительных пластических деформаций $\Delta_{пл} = 0,05-0,08$ мм/мм.

Пластическая прочность всех запроектированных составов смеси удовлетворяет технологическому диапазону и $P_{пл} = 1,2-2,4$ кПа.

При этом возможность применения мелкозернистых смесей в технологии 3D-печати оценивается по следующим характеристикам:

- пластичность (оценка предела пластичности) $K_i(I) = 1,0-2,5$ кПа;
- формоустойчивость: структурная прочность свежей смеси $\sigma_0 = 1-3$ кПа, обеспечивающая восприятие нагрузки без деформирования слоя, пластическая прочность свежей смеси $\sigma_{пл} = 30-40$ кПа, обеспечивающая восприятие нагрузки при относительной деформативности слоя $\Delta_{пл} \leq 0,1$ мм/мм;
- пластическая прочность $P_{пл} = 1,0-2,5$ кПа.

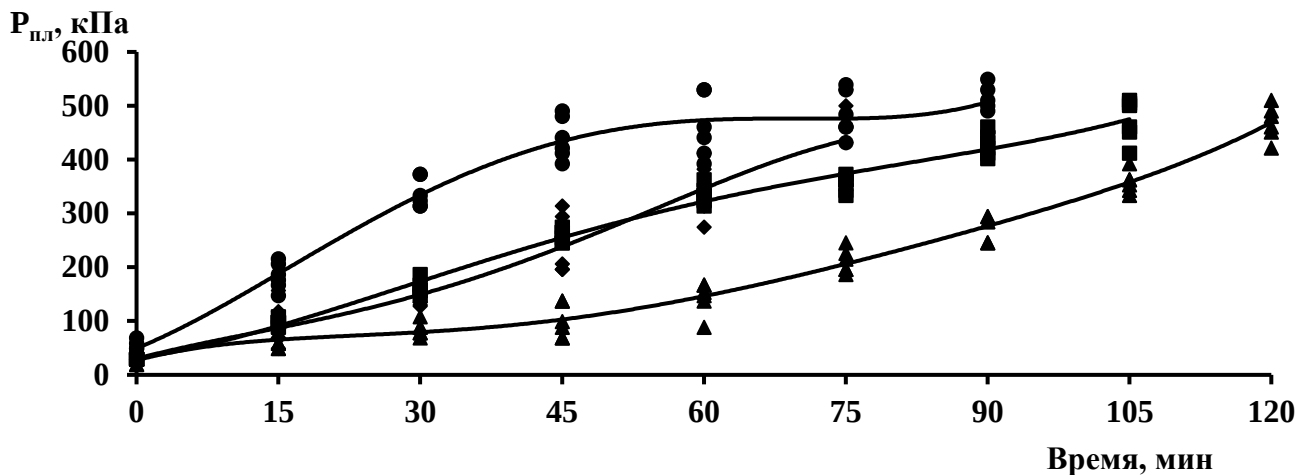


Обозначено: ••• – ЦМ – Песок (ЦМ – П); — — — — — ЦМ – Гранит Орех (ЦМ – ГО);
 — • — — — — ЦМ – Пигмент красный – Гранит Орех – Сланец (ЦМ – ПК – ГО – С);
 — — — — — ЦМ – Пигмент зеленый – Гранит Орех – Змеевик (ЦМ – ПЗ – ГО – З)

Рисунок 4.2 – Приведенные экспериментальные кривые «относительные деформации – напряжение», «относительные деформации – время» запроектированных составов смесей

Для всех систем удалось обеспечить сочетание реологических характеристик в требуемом диапазоне, что согласуется с технологическими показателями по показателю пластической прочности, за счет проектирования состава путем подбора соотношения объемных долей компонентов системы (матрицы и заполнителя) в соответствии со структурным параметром, обеспечивающим рациональное значение толщины прослойки цементного теста с учетом размера зерен заполнителя.

Процессы схватывания и раннего структурообразования мелкозернистых цементных смесей. Согласно полученным экспериментальным результатам (рисунок 4.3) начало процесса схватывания запроектированных мелкозернистых цементных смесей находится в диапазоне от 75 до 120 минут, что обеспечивает сохранность свойств смеси для обеспечения технологического процесса печати.



Обозначено: ● – ЦМ – Песок (ЦМ – П); ■ – ЦМ – Гранит Орех (ЦМ – ГО);
 ◆ – ЦМ – Пигмент красный – Гранит Орех – Сланец (ЦМ – ПК – ГО – С);
 ▲ – ЦМ – Пигмент зеленый – Гранит Орех – Змеевик (ЦМ – ПЗ – ГО – З)

Рисунок 4.3 – Кинетика пластической прочности декоративных цементных смесей

В таблице 4.6 представлены комплексные экспериментальные данные о времени начала схватывания τ , зафиксированного стандартным способом (на приборе Вика), и значения пластической прочности $R_{пл}$, определенные от момента приготовления смеси до начала ее схватывания, для всех исследованных систем.

Таблица 4.6 – Сроки схватывания декоративных цементных смесей

Наименование состава	Схватывание	
	$R_{пл}$, кПа	τ , мин
ЦМ – Песок	505	90
ЦМ – Гранит Орех	464	105
ЦМ – Пигмент красный – Гранит Орех – Сланец	467	75
ЦМ – Пигмент зеленый – Гранит Орех – Змеевик	474	120

Для смесей с меньшими значениями структурного параметра $\delta_{цм}/d_{ср} = 0,183-0,185$ (с песком и гранит орех + сланец) характерно начало схватывания смеси в диапазоне от 75 до 90 минут, когда для смесей с большими значениями $\delta_{цм}/d_{ср}$ (гранит орех и гранит орех + змеевик) время начала схватывания увеличивается до 105-120 минут.

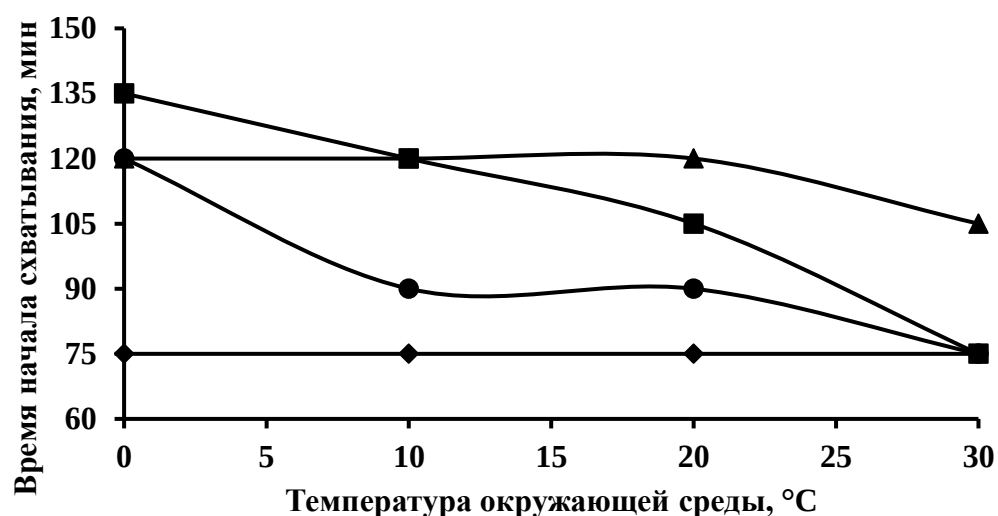
Поскольку для технологии строительной 3D-печати характерно ее применение непосредственно на площадке строительства, что не позволяет контролировать температуру окружающей среды, необходимо установить сроки начала схватывания смесей при различной температуре (таблица 4.7, рисунок 4.4).

Таблица 4.7 – Сроки схватывания декоративных смесей при различной температуре

Наименование состава	Температура внешнего воздуха, °C	Схватывание	
		Р _{пл.} , кПа	τ, мин
ЦМ – Песок	0 ± 2	518	120
	10 ± 2	510	90
	20 ± 2	505	90
	30 ± 2	539	75
ЦМ – Гранит Орех	0 ± 2	443	135
	10 ± 2	453	120
	20 ± 2	464	105
	30 ± 2	490	75
ЦМ – Пигмент красный – Гранит Орех – Сланец	0 ± 2	474	75
	10 ± 2	438	75
	20 ± 2	467	75
	30 ± 2	459	75
ЦМ – Пигмент зеленый – Гранит Орех – Змеевик	0 ± 2	503	120
	10 ± 2	488	120
	20 ± 2	474	120
	30 ± 2	493	105

Анализ результатов экспериментальных исследований влияния температуры на процессы раннего структурообразования запроектированных систем позволил установить, что для систем ЦМ – П и ЦМ – ГО происходит закономерное увеличение времени схватывания при снижении температуры воздуха до 0 °C, и ускорение – при повышении температуры до + 30 °C. Для систем, в составе матриц которых присутствует железосодержащий пигмент, характерно незначительное снижение сроков схватывания, что вероятно обусловлено влиянием Fe₂O₃ на тепловыделение цементных композиционных смесей в первые несколько часов гидратации, результаты опубликованы в работе [142]. При введении пигментов на основе железных окислов наблюдается повышение температуры смеси более 55 °C, что практически

в 2 раза превышает максимальную рассмотренную температуру окружающей среды.



Обозначено: ● – ЦМ – Песок (ЦМ – П); ■ – ЦМ – Гранит Орех (ЦМ – ГО);
 ◆ – ЦМ – Пигмент красный – Гранит Орех – Сланец (ЦМ – ПК – ГО – С);
 ▲ – ЦМ – Пигмент зеленый – Гранит Орех – Змеевик (ЦМ – ПЗ – ГО – З)

Рисунок 4.4 – Влияние температуры окружающей среды на период раннего структурообразования декоративных смесей

Таким образом, вне зависимости от внешних условий и состава, начало схватывания смесей всех запроектированных составов наступает не ранее 75 минут, что обеспечивает их пригодность для технологии строительной 3D-печати.

4.3 Физико-механические свойства и физико-климатическая стойкость декоративных композитов для строительной 3D-печати

Исследование процесса твердения и оценка прочности. Скорость роста прочности на сжатие и достигаемые ее значения для декоративных композитов всех запроектированных составов отличаются незначительно (таблица 4.8). Для всех исследуемых систем характерна высокая скорость набора прочности – уже к 1 суткам твердения ее значения достигают величины 36-48 МПа, к 7 суткам – 46-58 МПа (рисунок 4.5).

Таблица 4.8 – Экспериментальные данные о кинетике набора прочности запроектированных композитов

Наименование системы	Прочность на сжатие (МПа) при продолжительности твердения							
	1 сутки	3 сутки	7 сутки	14 сутки	28 сутки	2 мес.	3 мес.	4 мес.
ЦМ – П	47,7	47,9	52,9	53,7	67,9	71,0	75,1	72,7
ЦМ – ГО	44,8	48,4	52,0	54,8	60,9	66,6	67,2	68,3
ЦМ – ПК – ГО – С	41,6	53,8	57,9	61,5	63,8	72,7	73,7	74,0
ЦМ – ПЗ – ГО – З	36,5	45,3	46,7	46,0	54,5	52,4	54,7	55,7

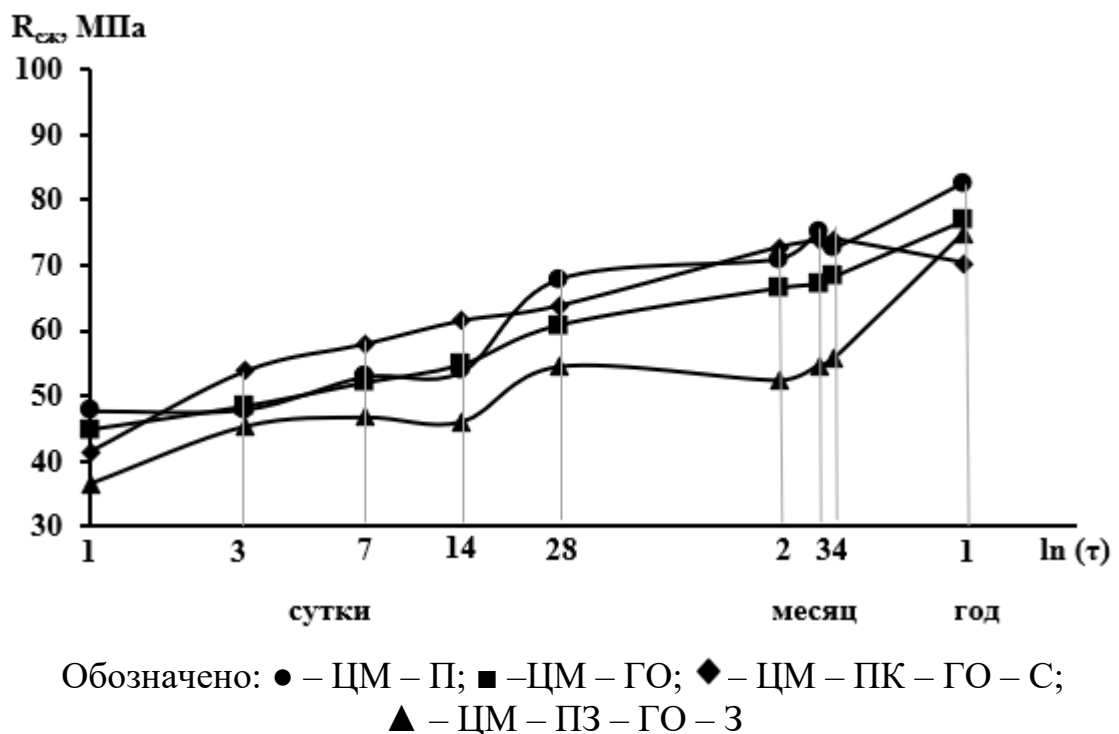


Рисунок 4.5 – Кинетика набора прочности запроектированных композитов

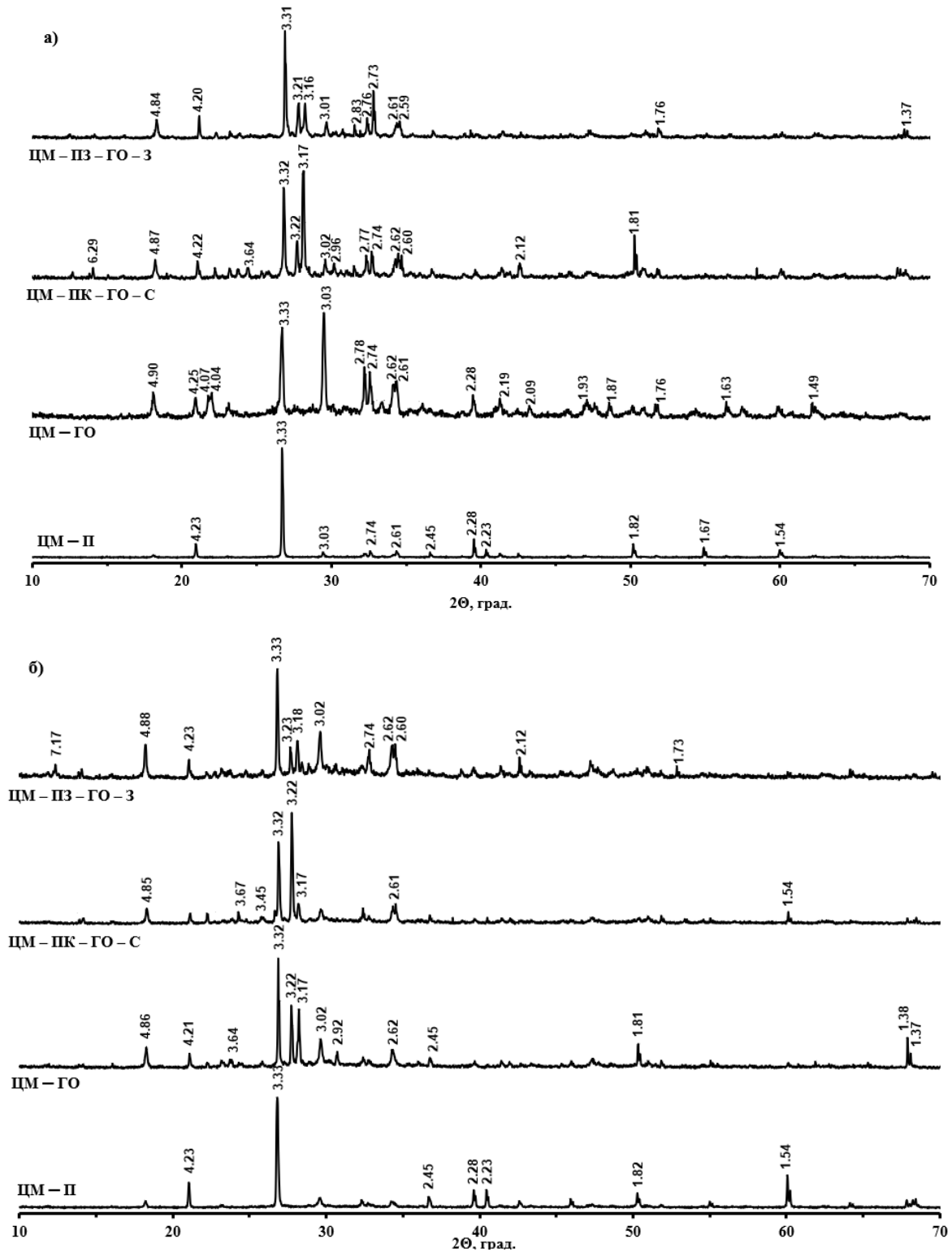
Введение пигментов в малых дозировках (0,2 % от массы цемента) не оказывает заметного влияния на скорость твердения и достигаемые значения прочности, однако зафиксированы негативные эффекты падения прочности в 14 сутки твердения, которые прекращают свое действие к 28 суткам.

В результате по достижении нормативного срока твердения (28 суток) происходит существенное упрочнение всех полученных композитов для 3D-печати, к этому моменту прочность всех исследованных систем находится в диапазоне 54-68 МПа, что обеспечивает возможность получения изделий с высокими показателями прочности. К 1 году прочность повышается на 10-30 % относительно 28 суток и достигает значений более 70 МПа.

Высокие прочностные показатели композитов связаны с высокой активностью белого цемента, в котором высокое содержание C_3S и C_3A обеспечивает быструю гидратацию в ранние сроки, что соотносится с результатами рентгенодифрактометрических исследований (рисунок 4.6, таблица 4.9, Приложение А). Степень гидратации всех систем к 1 суткам достигает значений 81-83 %, а к 28 суткам 84-95 %. Ранее в исследованиях [146] было установлено, что вид заполнителя не влияет на степень гидратации, но оказывает влияние на фазовый состав продуктов.

Для системы Ц – П характерен постепенный рост прочности во всем исследуемом периоде. Кварцевый песок является химически инертным заполнителем, а комплексное воздействие суперпластификатора и жидкого стекла позволяет сформировать плотную, однородную структуру с минимальной пористостью, что соотносится с данными сканирующей электронной микроскопии композита в возрасте 1 года (рисунок 4.7 а).

Для системы ЦМ – ГО характерны показатели прочности ниже, чем для системы ЦМ – П. Несмотря на то, что гранит также является химически инертным заполнителем, особенности морфологии его поверхности приводят к росту пористости на границе раздела «заполнитель – цементный камень» (рисунок 4.7 б), что определяет его более низкую прочность.



Обозначено: SiO_2 ($d = 4.25, 3.35, 2.45, 1.82, 1.54, 1.38$); $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($d = 3.04, 2.84, 2.70, 1.90, 1.80, 1.66$); $(\text{CaO})_x \cdot \text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ ($d = 4.92, 3.05, 2.93, 2.80, 2.31, 1.83$); $2\text{CaO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($d = 4.24, 3.84, 3.36, 3.15, 2.85, 2.65$); $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ($d = 3.17, 2.83, 2.81, 2.72, 2.14, 1.94$); $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ($d = 3.20, 2.51, 2.14, 1.84, 1.48, 1.39$); $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ($d = 4.91, 4.27, 3.34, 3.19, 2.70, 1.81$); $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ($d = 3.04, 2.78, 2.61, 2.19, 1.77, 1.63$)

Рисунок 4.6 – Рентгенограммы цементных композитов
на основе запроектированных мелкозернистых смесей
а) 1 сутки; б) 28 сутки

Таблица 4.9 – Фазовый состав и степень гидратации цементных композитов на основе запроектированных мелкозернистых смесей

Система	1 сутки твердения		28 суток твердения	
	C_2 , %	Фазовый состав	C_2 , %	Фазовый состав
ЦМ – П	81	SiO_2 $2CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ $(CaO)_x \cdot SiO_2 \cdot zH_2O$ $3CaO \cdot SiO_2$	84	SiO_2 $(CaO)_x \cdot SiO_2 \cdot zH_2O$
ЦМ – ГО	83	$(CaO)_x \cdot SiO_2 \cdot zH_2O$ $2CaO \cdot 3SiO_2 \cdot H_2O$ $CaO \cdot 2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 4H_2O$ $3CaO \cdot SiO_2$	91	$CaO \cdot 2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 4H_2O$ $2CaO \cdot 3SiO_2 \cdot H_2O$ $(CaO)_x \cdot SiO_2 \cdot zH_2O$
ЦМ – ПК – ГО – С	81	$3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ $2CaO \cdot 3SiO_2 \cdot H_2O$ $CaO \cdot 2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 4H_2O$ $3CaO \cdot SiO_2$	88	$CaO \cdot 2SiO_2 \cdot Al_2O_3$ $CaO \cdot 2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 4H_2O$ $2CaO \cdot 3SiO_2 \cdot H_2O$
ЦМ – ПЗ – ГО – 3	80	$2CaO \cdot 3SiO_2 \cdot H_2O$ $CaO \cdot 2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 4H_2O$ $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ $3CaO \cdot SiO_2$	95	$2CaO \cdot 3SiO_2 \cdot H_2O$ $CaO \cdot 2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 4H_2O$ $(CaO)_x \cdot SiO_2 \cdot zH_2O$ $3CaO \cdot SiO_2$

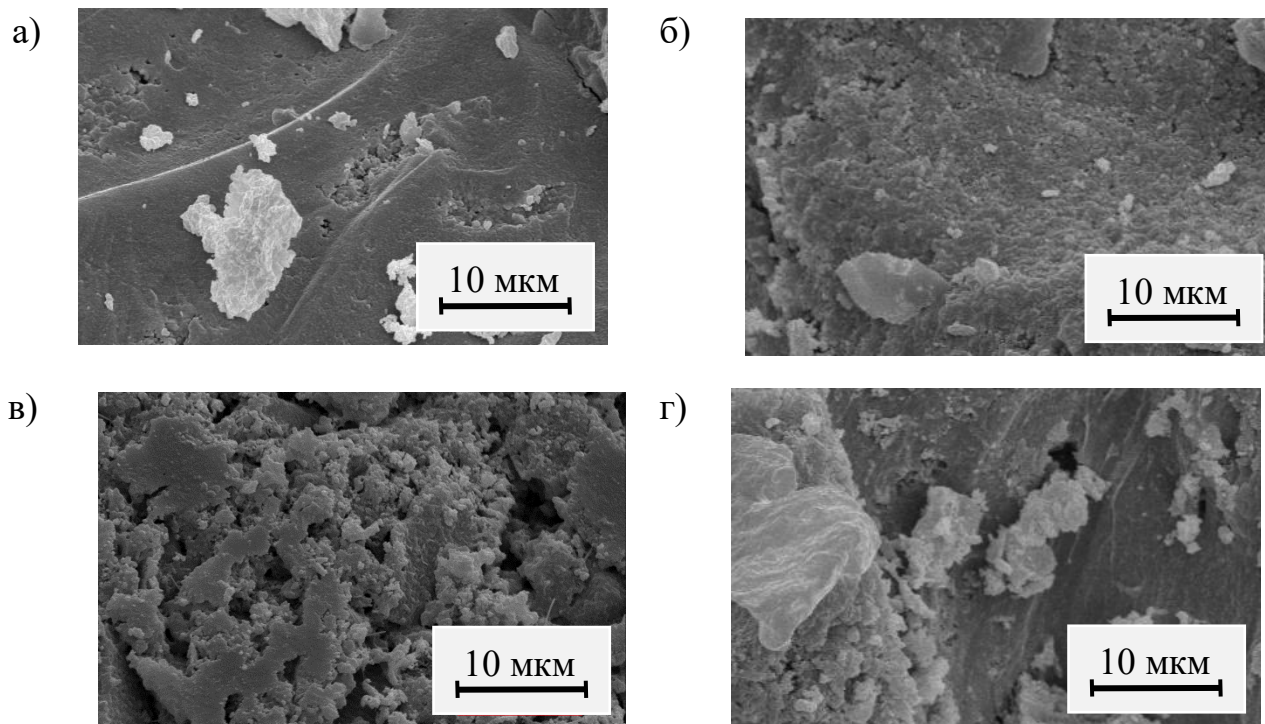


Рисунок 4.7 – Микрофотографии исследуемых декоративных композитов
а) ЦМ – П; б) ЦМ – ГО; в) ЦМ – ПК – ГО – С; г) ЦМ – ПЗ – ГО – 3

Для системы ЦМ – ПК – ГО – С характерны высокие показатели прочности в первый месяц, однако после 4 месяцев происходит падение прочности с 74,0 МПа до 70,4 МПа. Вероятно, это связано с тем, что сланец потенциально может приводить к образованию расширяющегося геля на поздних сроках, который разрывает структуру, делая ее пористой, что объясняет падение прочности и соотносится с данными СЭМ (рисунок 4.7 в).

Самая низкая прочность в первые сутки характерна для системы ЦМ – ПЗ – ГО – 3, что возможно связано с замедлением процессов гидратации портландцементного клинкера в результате комплексного воздействия камеди и железосодержащего пигмента (см. табл. 4.8). После завершения эффекта замедления, начинается медленная, но глубокая гидратация, и уже к 28 суткам степень гидратации составила 95 %. В результате к 1 году прочность данной системы составляет 75 МПа, а ее структуру можно охарактеризовать как достаточно плотную (рисунок 4.7 г).

По результатам экспериментальных данных установлено, что температура воздуха оказывает наибольшее влияние на процесс твердения смесей с добавками пигментов ЦМ – ПК – ГО – С и ЦМ – ПЗ – ГО – 3 (таблица 4.10, рисунок 4.8). Ранняя прочность (1 сутки) указанных композитов, твердевших при температуре 0 °С оказалась ниже в 2,5-3 раза, чем стандартной температуре $t = + 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и составила 8-12 МПа против 30-40 МПа. Одновременно для этих систем зафиксировано падение ранней прочности на 10-12% и при твердении при $t = + 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ по отношению к твердению при стандартной температуре $t = + 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Аналогичные негативные эффекты падения прочности зафиксированы в проектном возрасте (28 суток) при твердении как при пониженной температуре $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, так и при повышенной $t = + 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ по отношению к твердению при стандартной температуре $t = + 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для систем ЦМ – П и ЦМ – ГО при снижении температуры твердения характерно падение только ранней прочности (в 1 сутки). Во время твердения при повышенных температурах для данных систем напротив, выявлен эффект повышения прочности. Их прочность в проектном возрасте практически не зависит от условий твердения композита и находится в диапазоне 60-68 МПа.

Таблица 4.10 – Прочность на сжатие запроектированных композитов, выдержанных при различной температуре внешней среды

Наименование системы	Температура, °C	Прочность, МПа	
		1 сутки	28 суток
ЦМ – П	0 ± 2	28,8	64,6
	20 ± 2	47,7	67,9
	30 ± 2	48,04	66,41
ЦМ – ГО	0 ± 2	15,0	62,7
	20 ± 2	44,8	60,9
	30 ± 2	47,7	61,2
ЦМ – ПК – ГО – С	0 ± 2	12,4	57,3
	20 ± 2	41,6	63,8
	30 ± 2	38,6	52,7
ЦМ – ПЗ – ГО – З	0 ± 2	8,46	42,1
	20 ± 2	36,5	54,5
	30 ± 2	32,2	40,5

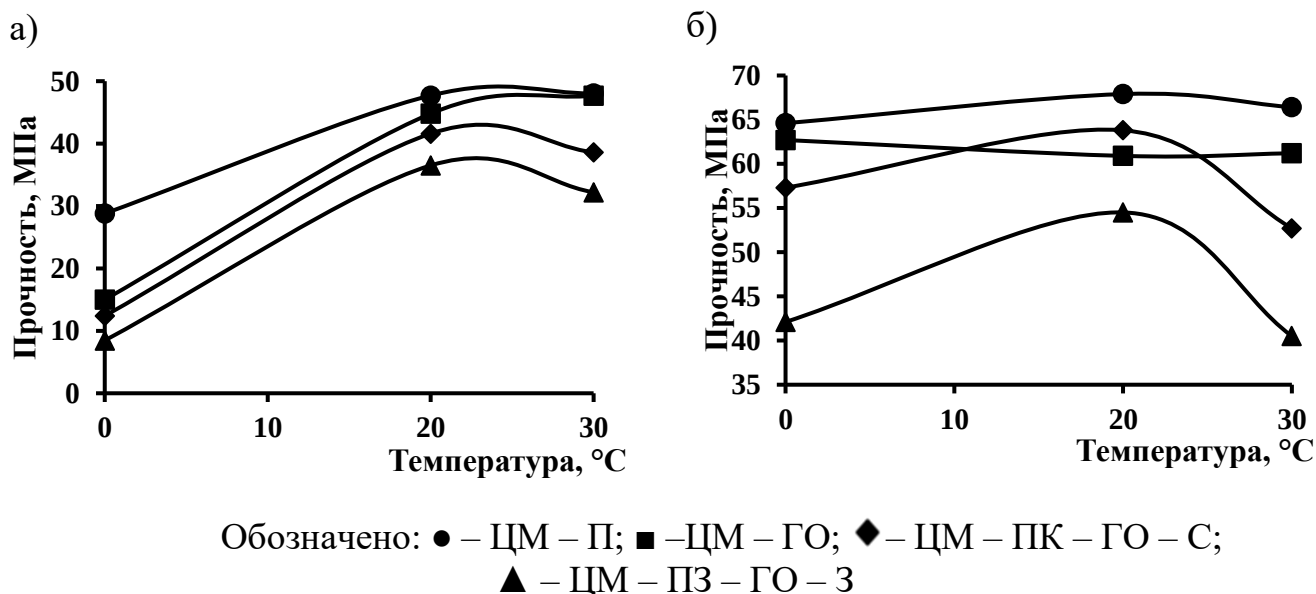


Рисунок 4.8 – Влияние температуры на прочность запроектированных систем
а) 1 сутки; б) 28 суток

На основании полученных результатов можно утверждать, что смеси без пигментов рекомендованы для печати объектов при температуре воздуха 0 – + 30 °C, смеси с пигментами могут быть использованы при печати объектов при стандартной температуре твердения + 20 °C.

Таким образом, в процессе исследований запроектированных составов мелкозернистых цементных смесей для архитектурных композитов с текстурой искусственного камня удалось обеспечить оптимальные для условий 3D-печати сроки схватывания, пластическую прочность, высокую скорость набора и достигаемые значения прочности.

Комплексная оценка показателей физико-климатической стойкости. Произведена оценка:

- естественной влажности после твердения образцов в стандартных условиях ($W_0 = (m_{\text{ест.вл}} - m_{\text{сух}}) / m_{\text{сух}}$);
- полного водопоглощения после водонасыщения высушенных до постоянной массы образцов ($W_1 = (m_{\text{в.насыщ}} - m_{\text{сух}}) / m_{\text{сух}}$);
- эксплуатационного водопоглощения после водонасыщения образцов от состояния естественной влажности ($W_2 = (m_{\text{в.насыщ}} - m_{\text{ест.вл}}) / m_{\text{ест.вл}}$),
- коэффициента размягчения как отношения прочности образцов в водонасыщенном состоянии к прочности в состоянии естественной влажности ($K = R_{\text{вл}} / R_{\text{ест.вл}}$);

Результаты испытаний образцов, представленные в таблице 4.11, позволили установить следующее. Влажность после твердения композитов, полученных на основе запроектированных составов смесей, находится в диапазоне $W_0 \sim 8-9 \%$.

Таблица 4.11 – Естественная влажность, полное и эксплуатационное водопоглощения, коэффициент размягчения декоративных композитов

Наименование системы	$W_0, \%$	$W_1, \%$	$W_2, \%$	K	$R_{\text{ест.вл}}, \text{МПа}$	$R_{\text{вл}}, \text{МПа}$
ЦМ – П	8,24	8,48	0,2	0,62	67,9	42,2
ЦМ – ГО	8,80	9,13	0,3	0,63	60,9	38,4
ЦМ – ПК – ГО – С	8,58	9,39	0,8	0,73	63,8	46,5
ЦМ – ПЗ – ГО – З	8,18	9,10	0,9	0,60	54,5	32,7

Важно подчеркнуть, что для всех опытных образцов композитов величина полного водопоглощения высушенных образцов очень близка значениям их естественной влажности. Поэтому величина эксплуатационного водопоглощения образцов всех композитов не превышает 1 %. Коэффициент размягчения композитов

$K = 0,60-0,73$ находится в диапазоне значений, характерных для традиционных цементных бетонов сопоставимой прочности.

Результаты испытаний декоративных композитов, полученных на основе запроктированных составов смесей, представленные в таблице 4.12 и на рисунке 4.9, позволяют заключить что морозостойкость всех композитов соответствует марке F200.

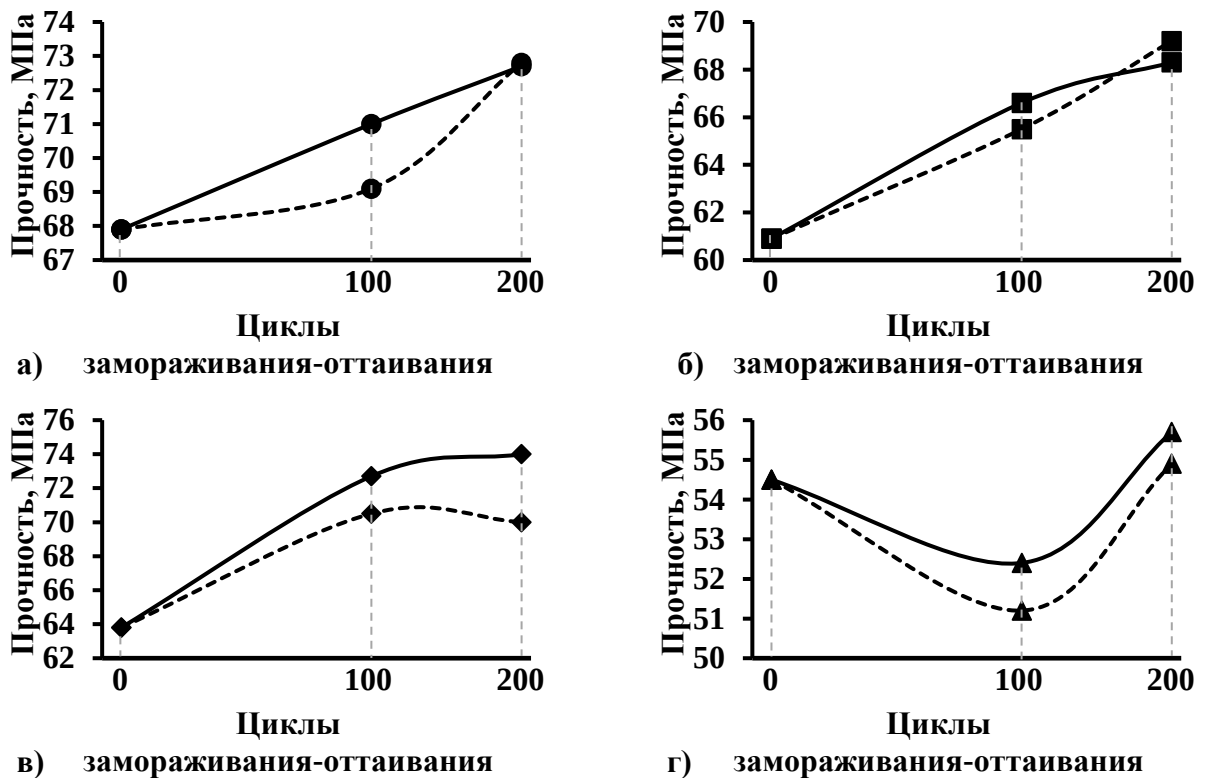
Таблица 4.12 – Результаты испытаний декоративных композитов на морозостойкость*

Внешние условия перед испытаниями	Средняя прочность, МПа			
	ЦМ – П	ЦМ – ГО	ЦМ – ПК – ГО – С	ЦМ – ПЗ – ГО – З
28 суток (0 циклов)	67,9	60,9	63,8	54,5
Контрольные образцы (100 циклов)	71,0	66,6	72,7	52,4
100 циклов замораживания-оттаивания	69,1	65,5	70,5	51,2
Относительное изменение прочности, %	- 2,7	- 1,6	- 3,0	- 2,3
Контрольные образцы (200 циклов)	72,7	68,3	74,0	55,7
200 циклов замораживания-оттаивания	72,8	69,2	70,0	54,9
Относительное изменение прочности, %	+ 0,1	+ 1,3	- 5,4	- 1,4

*Примечание. Относительное изменение прочности: со знаком «-» падение прочности, «+» увеличение прочности.

Падение прочности образцов в контрольный срок испытаний не превышает 6 %. Более того для ряда составов композитов наблюдается аномальное повышение прочности для образцов после 200 циклов их замораживания – оттаивания (рисунок 4.9 а, б). Данные испытаний нельзя отнести к ошибке опыта, так как тенденция увеличения прочности после большего числа циклов замораживания-оттаивания характерна для образцов композитов составов ЦМ – П и ЦМ – ГО, где в составе цементной матрицы нет железосодержащих пигментов. Это может быть обусловлено высокой физико-химической активностью цементирующего композитов, в результате чего вклад конструктивных процессов структурообразования в процессы длительного твердения и упрочнения оказывается выше деструктивных процессов разрушения структуры от кристаллизационного давления льда при замораживании.

При этом для всех запроектированных композитов прочность после 200 циклов попеременного замораживания-оттаивания превышает проектную прочность, что определяет высокий потенциал физико-климатической стойкости запроектированных мелкозернистых композитов для 3D-печати.



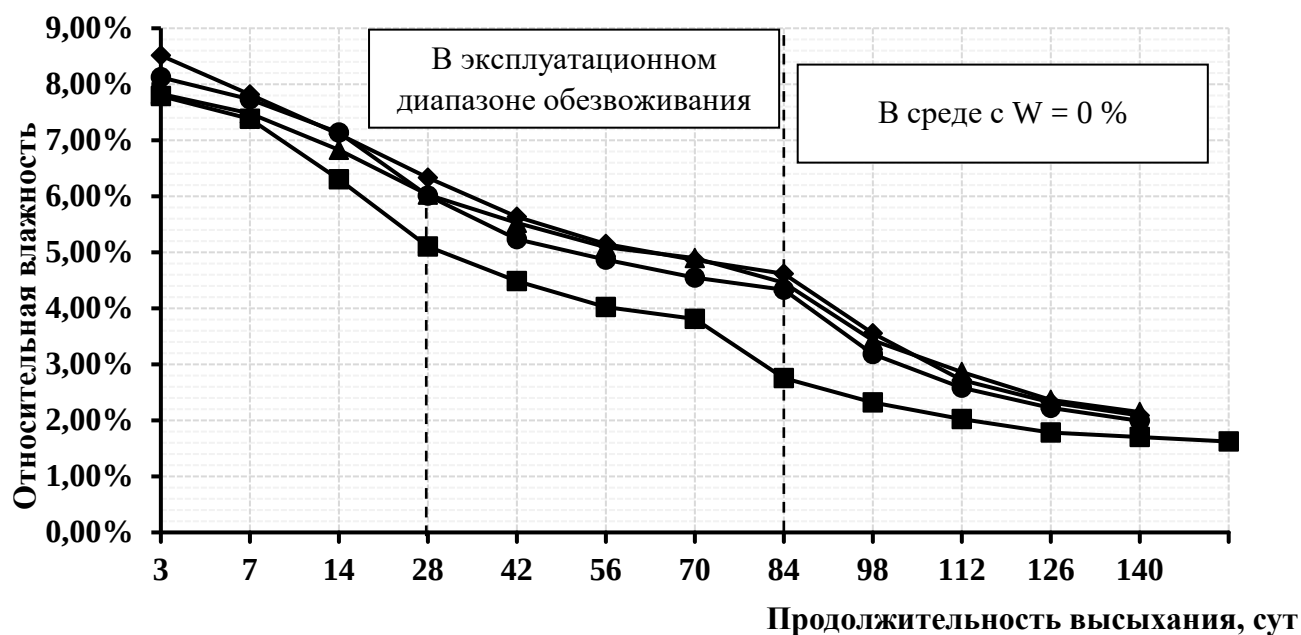
Обозначено:

— — — — — контрольные образцы; — — — — — после циклов замораживания-оттаивания

Рисунок 4.9 – Результаты испытаний запроектированных композитов на морозостойкость

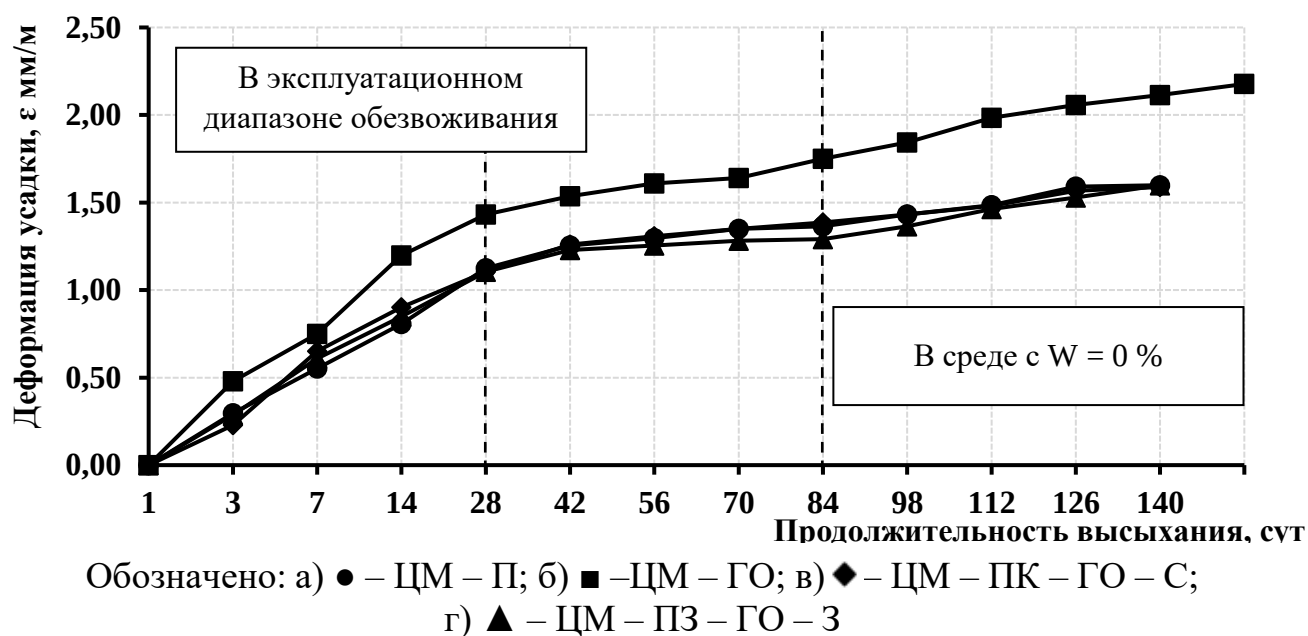
а) ЦМ – П; б) ЦМ – ГО; в) ЦМ – ПК – ГО – С; г) ЦМ – ПЗ – ГО – З

Анализ кинетики обезвоживания и деформирования (рисунки 4.10 и 4.11) позволяет заключить, что процесс развития усадочных деформаций всех образцов архитектурных композитов в основном завершается к 28 суткам выдерживания в условиях, моделирующих эксплуатационные. При этом потеря массы и уменьшение их относительной влажности продолжается в течение 42-56 суток. Важно также подчеркнуть, что глубокое обезвоживание образцов до равновесной влажности $\sim 2\%$ (в среде с $W = 0\%$) не привело к существенному росту усадочных деформаций.



Обозначено: а) ● – ЦМ – П; б) ■ – ЦМ – ГО; в) ◆ – ЦМ – ПК – ГО – С;
г) ▲ – ЦМ – ПЗ – ГО – З

Рисунок 4.10 – Кинетика высыхания запроектированных композитов



Обозначено: а) ● – ЦМ – П; б) ■ – ЦМ – ГО; в) ◆ – ЦМ – ПК – ГО – С;
г) ▲ – ЦМ – ПЗ – ГО – З

Рисунок 4.11 – Деформации усадки запроектированных композитов

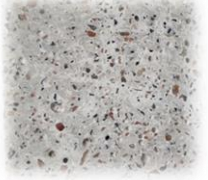
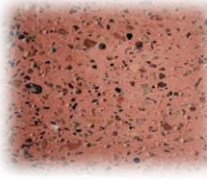
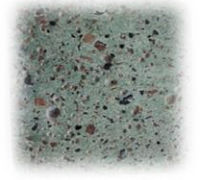
Деформации усадки декоративных композитов с текстурой искусственного камня в эксплуатационном диапазоне обезвоживания $\varepsilon = 1,3-1,7$ мм /м, при глубоком обезвоживании – $\varepsilon = 1,6-2,2$ мм/м. Данные значения деформаций, а также замедление их развития при продолжении потери массы, в том числе в экстремально сухих условиях, позволяет прогнозировать высокий потенциал трещиностойкости разработанных декоративных композитов при их высыхании в процессе эксплуатации.

Результаты независимых испытаний свойств декоративных композитов. После завершения комплекса экспериментальных исследований на основе разработанных составов было изготовлено необходимое количество опытных образцов смесей и композитов (таблица 4.13), которым были присвоены товарные обозначения. Образцы были испытаны в аккредитованной независимой испытательной лаборатории Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова ВГТУ. Данные о результатах испытаний представлены в таблице 4.13. Протоколы испытаний представлены в приложении Б.

Данные независимых испытаний полностью соответствуют данным собственных лабораторных испытаний и позволяют сделать заключение о соответствии технологических характеристик смесей и свойств полученных декоративных композитов условиям использования во всем жизненном цикле 3D-печати и эксплуатации 3D-печатных конструкций.

По результатам испытаний на состав 3D.A.TIЭ.B60 получен патент Приложение В.

Таблица 4.13 – Данные комплексных независимых испытаний декоративных смесей и композитов для 3D-печати

Наименование системы	ЦМ – П	ЦМ – ГО	ЦМ – ПК – ГО – С	ЦМ – ПЗ – ГО – 3
Товарное название	3D.A.TIЭ.B60	3D.A.TII.B55	3D.A.TIV.B60	3D.A.TV.B45
Фото образца				
Характеристики смесей и композитов				
Оценка предела пластичности, кПа	2,37	1,94	2,38	2,23
Структурная прочность, кПа	1,12	1,42	1,95	2,39
Пластическая прочность, кПа	45,64	42,77	42,00	35,10
Относительная деформация слоя, мм/мм·10 ⁻³	60	80	50	40
Начало схватывания, мин	75	105	75	120
Прочность на сжатие (24 часа), МПа	47,72	44,70	41,60	36,50
Прочность на сжатие (28 сут), МПа	67,80	61,00	63,70	54,50
Прочность сцепления слоев (предел прочности на растяжение при раскалывании), МПа	3,45	3,07	4,30	3,10
Плотность композиционного материала, кг/м ³	2260	2206	2231	2139
Водопоглощение композиционного материала от естественной влажности, %	0,22	0,31	0,74	0,86
Морозостойкость, цикл	200			
Усадка (в эксплуатационном диапазоне обезвоживания), мм/м	≤ 1,4	≤ 1,7	≤ 1,4	≤ 1,3

4.4 Выводы по главе 4

1. На основании экспериментальной апробации методики и алгоритма проектирования доказано, что предложенный структурный параметр и диапазон его значений (отношение толщины прослойки цементной матрицы к среднему диаметру частиц заполнителя от 0,15 до 0,21) являются критериальными для обеспечения пригодности смеси к технологии строительной 3D-печати. Предложенная методика проектирования составов мелкозернистых бетонов доказала свою эффективность, подобрано 4 состава декоративного бетона, пригодных для технологии экструзионной безопалубочной печати и обладающих эстетической привлекательностью.

2. Технологические и реологические характеристики смесей всех запроектированных составов находятся в диапазоне значений, необходимом для эффективной строительной 3D-печати. Пластическая прочность составляет 1,2-2,4 кПа, что соотносится с соответствующими реологическими свойствами: способность смеси к перекачиванию от места приготовления к печатающей головке и способность формировать бездефектный печатный слой в процессе экструзии обеспечено по оценке предела пластичности $K_i(I) = 1,2-2,4$ кПа; способность экструдированного слоя сохранять свою форму после экструзии и под давлением вышележащих слоев обеспечено по показателям структурной прочности $\sigma_0 = 1,1-2,4$ кПа и пластической прочности $\sigma_{пл} = 35-46$ кПа, при относительной деформации слоя $\Delta_{пл} = 0,05-0,08$ мм/мм. Возможность осуществлять технологический процесс печати обеспечена сохранностью свойств во времени, начало схватывания всех смесей наступает не раньше 75 минут.

3. Для композитов, полученных на основе запроектированных составов декоративных смесей, характерны высокие показатели прочности в 1 сутки 36-48 МПа и в 28 суток – 54-68 МПа. При этом сохранность прочностных характеристик зафиксирована на протяжении всего периода исследования до 1 года, и достигает значений более 70 МПа.

4. Полученные декоративные композиты обладают высокими показателями физико-климатической стойкости: величина эксплуатационного водопоглощения не превышает 1 %, морозостойкость – 200 циклов, деформации усадки в эксплуатационном диапазоне обезвоживания $\varepsilon = 1,3-1,7$ мм/м. Это позволяет прогнозировать высокий потенциал эксплуатационной стойкости и долговечности.

5. Высокий уровень качества полученных декоративных смесей и композитов подтвержден результатами независимых испытаний в аккредитованной лаборатории, на основании чего получен патент № 2767805 «Двухфазная смесь на основе белого цемента для получения декоративного композита в технологии строительной 3D-печати».

5 АПРОБАЦИЯ И ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные теоретические исследования и полученные экспериментальные зависимости использованы при реализации прикладных разработок, позволяющих расширить ассортимент производимых смесей, применяемых в технологии строительной экструзионной безопалубочной печати.

Апробация и внедрение результатов исследования произведены:

1. При реализации программы «СТАРТ-1» (4 очередь) по проекту «3D-печать многофункциональных малых архитектурных форм», договор №3467ГС1/57495 с Федеральным государственным бюджетным учреждением «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (2020-2021 г.г.). Апробированы составы смесей (приложение Б) и получен патент [147] (приложение В).

2. При изготовлении опытной партии сухих смесей для строительной 3D-печати, что подтверждено актом внедрения результатов научных исследований в производственный процесс предприятия ООО «СТРОЙСАНТЕХМОНТАЖ» при выпуске 40 тонн смесей. (Приложение Д).

3. При запуске опытно-промышленной производственной площадки ФГБОУ ВО «ВГТУ» с использованием отечественного технологического комплекса строительной 3D-печати производства компании ООО «КЕЙКОД».

4. Разработанные составы мелкозернистых смесей внедрены в производственном цехе предприятия ООО «БетоникАРТ», выпущена опытная партия вазонов и декоративных фигур (приложение Е).

Результаты исследований и апробации использованы для разработки предложений в технологический регламент при производстве сухих строительных смесей (приложение Г).

На основании апробации (раздел 5.1) разработаны рекомендации по изготовлению изделий из мелкозернистых цементных смесей, получаемых для технологии

строительной 3D-печати, изложенные в разделе 5.2, а также произведена оценка технико-экономической эффективности производства малых архитектурных форм методом экструзионной безопалубочной печати (раздел 5.3).

Теоретические положения и экспериментальные результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов имени профессора Ю. М. Борисова Воронежского государственного технического университета при подготовке магистров, обучающихся по направлению 08.04.01 «Строительство», программы «Эффективные строительные конструкции и изделия, основания и фундаменты, инженерно-геологические изыскания» в рамках дисциплины «Эффективные композиционные конструкции» (Приложение Ж).

5.1 Разработка и апробация технологических решений

5.1.1 Технологические предложения и их апробация для производства сухих строительных смесей для 3D-печати

Результаты экспериментальных исследований позволили разработать рациональные составы сухих строительных смесей, обеспечивающих получение мелкозернистых бетонов с размером зерен заполнителей 0,16-5 мм, а также предложить способ их получения.

Рекомендации к составу сырьевых компонентов смеси. Исходными сырьевыми материалами для производства сухих строительных смесей являются:

- портландцемент по ГОСТ 31108-2020, ГОСТ 965-89;
- природные заполнители с размерами частиц от 0,16 мм до 5 мм;
- химические добавки, пластификаторы и модификаторы вязкости;
- добавки пигменты на основе железных окислов.

Рекомендации к расчету состава. Для расчета корректных пропорций компонентов смеси, мелкозернистый заполнитель получают путем смешивания не менее 3 стандартных фракций, содержание каждой из которых не превышает 75 % по массе. Экспериментально определяют истинную ($\rho_{\text{зап.ист}}$) и насыпную ($\rho_{\text{зап.нас}}$) плотности заполнителя и плотность упаковки частиц (ϕ). На основании подобранного фракционного состава заполнителя рассчитывают средний диаметр частиц заполнителя ($d_{\text{ср}}$) и задают толщину прослойки цементной матрицы ($\delta_{\text{цм}}$) используя ограничение $0,15 \cdot d_{\text{ср}} \leq \delta_{\text{цм}} \leq 0,21 \cdot d_{\text{ср}}$. Расчет массовых долей производят по формуле 5.1.

$$m_{\text{цем.матр}}/m_{\text{заполнителя}} = \frac{\rho_{\text{цем.матр}}}{\rho_{\text{зап.ист}}} \left(\left(\frac{1}{\phi} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i \cdot (d_i + \delta_{\text{цм}})^3}{d_i^3} \right) - 1 \right) \quad (5.1)$$

Где $\rho_{\text{цем.матр}}$ – плотность применяемой цементной матрицы, в зависимости от ее компонентного состава, a_i – доля остатка заполнителя на ситах i -ой фракции по массе, d_i – средний диаметр i -ой фракции.

Результаты исследований и апробации использованы для разработки предложений в технологический регламент при производстве сухих строительных смесей (приложение Г). Данный технологический регламент внедрен в производство ООО «СТРОЙСАНТЕХМОНТАЖ» и апробирован при выпуске опытной партии 40 тонн смесей, что подтверждено актом внедрения (Приложение Д).

5.1.2 Опытнo-промышленная апробация запроектированных составов декоративных бетонов при производстве 3D-печатных изделий

Апробация технологических решений, разработанных в диссертационном исследовании, производилась на производственной площадке ФГБОУ ВО «ВГТУ» с

использованием отечественного технологического комплекса строительной 3D-печати производства компании ООО «КЕЙКОД» (рисунок 2.1) и включала следующие шаги:

- выбор и создание моделей для печати,
- подготовка оборудования,
- подготовка смеси для печати,
- процесс печати.

Для печати были приняты три запроектированных состава смесей и для каждой из них приняты свои объекты и параметры режима печати (таблица 2.7).

Для малой архитектурной формы «Лошадь» была принята запроектированная смесь, состоящая из следующих компонентов: портландский цемент белый СЕМ I 52,5R, мелкозернистый заполнитель – кварцевый песок рядовой ($D = 160-1500$ мкм), в качестве пластифицирующей добавки – суперпластификатор Sika[®] ViscoCrete[®]20HE, в качестве модифицирующих добавок – камедь ксантановая и жидкое стекло, техническая вода, $B/C = 0,32$.

Для вазона: портландский цемент белый СЕМ I 52,5R, пигмент красный TP-303, мелкозернистый заполнитель – гранит орех ($D = 630-2500$ мкм) и сланец ($D = 1250-5000$ мкм), пластифицирующие и модифицирующие добавки аналогичные предыдущей смеси, техническая вода, $B/C = 0,33$.

Для декоративного элемента: портландский цемент белый СЕМ I 52,5R, пигмент зеленый Deqing tongchem CO, мелкозернистый заполнитель – гранит орех ($D = 630-2500$ мкм) и змеевик ($D = 2500-5000$ мкм), пластифицирующие и модифицирующие добавки аналогичные предыдущей смеси, техническая вода, $B/C = 0,33$.

Реологические и технологические характеристики смесей, выбранных для апробации представлены в разделе 4.2.

Для апробации печати были приняты различные малые архитектурные формы, позволяющие оценить возможность и диапазон применения запроектированных составов смесей. Объекты для печати и этапы их моделирования представлены на рисунке 5.1.

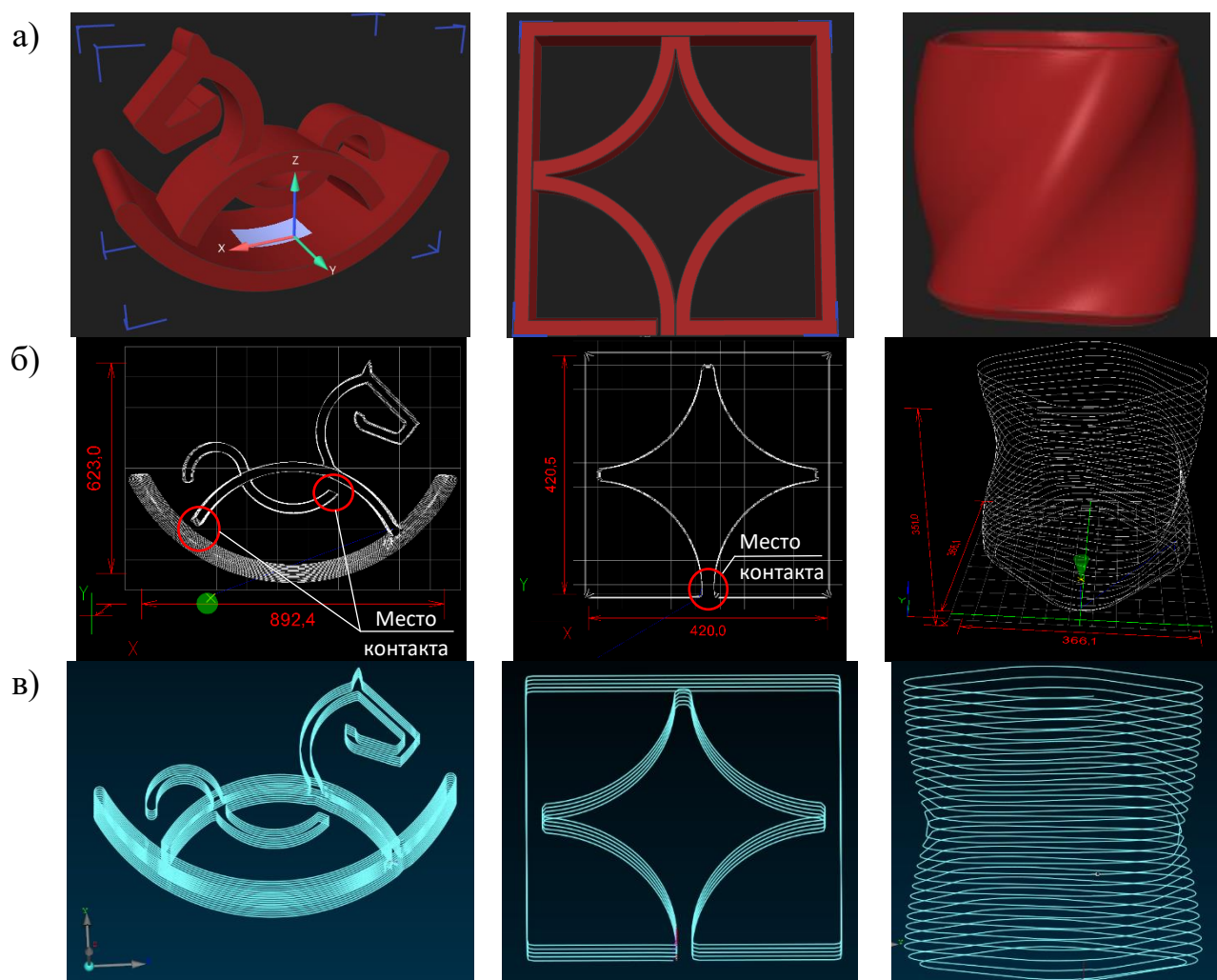


Рисунок 5.1 – Принятые для апробации модели а) объемная CAD-модель; б) разбиение на отдельные плоские слои; в) траектория движения, G-code.

После моделирования объекта и подготовки оборудования к печати производили изготовление необходимого объема смеси. В сухую смесь вводили затворитель и перемешивали в высокоскоростном смесителе в течении трех минут. После окончания перемешивания, перед началом печати производили отбор пробы смеси в 3 кольца с диаметром 10 см и высотой 5 см, в каждом из которых производили по 2 измерения (всего в серии 6 точек). Контроль технологических характеристик смеси осуществляли при помощи конического пластометра (рисунок 5.2), диапазоны полученных значений пластической прочности представлены в таблице 5.1.



Рисунок 5.2 – Контроль пластичности смеси перед печатью

Таблица 5.1 – Результаты контроля показателей смеси перед печатью

Обозначение системы	Исходные компоненты системы	$K_i(I)$, кПа	Значения пластической прочности $P_{пл}$, кПа
ЦМ – П (3D.A.TL.B60)	Портландцемент СЕМ I 52,5R, кварцевый песок, суперпластификатор Sika® ViscoCrete®20HE, камедь ксантановая, жидкое стекло, полипропиленовая фибра, техническая вода	2,4	2,2-2,4
ЦМ – ПК – ГО – С (3D.A.TIV.B60)	Портландцемент СЕМ I 52,5R, гранит орех, сланец терракотовый, пигмент красный «ТР-303», суперпластификатор Sika® ViscoCrete®20HE, камедь ксантановая, жидкое стекло, полипропиленовая фибра, техническая вода	2,4	2,2-2,4
ЦМ – ПЗ – ГО – З (3D.A.TV.B45)	Портландцемент СЕМ I 52,5R, гранит орех, змеевик, пигмент зеленый Deqing tongchem CO, суперпластификатор Sika® ViscoCrete®20HE, камедь ксантановая, жидкое стекло, полипропиленовая фибра, техническая вода	1,7	1,5-1,7

Для каждой используемой системы были обеспечены показатели оценки предела пластичности в диапазоне, отвечающем полученному в лабораторных условиях диапазону $P_{пл} = 1,5-2,4$ кПа.

По завершению печати из оставшейся в бункере смеси, также производили отбор пробы смеси и осуществляли контроль пластической прочности смеси. За

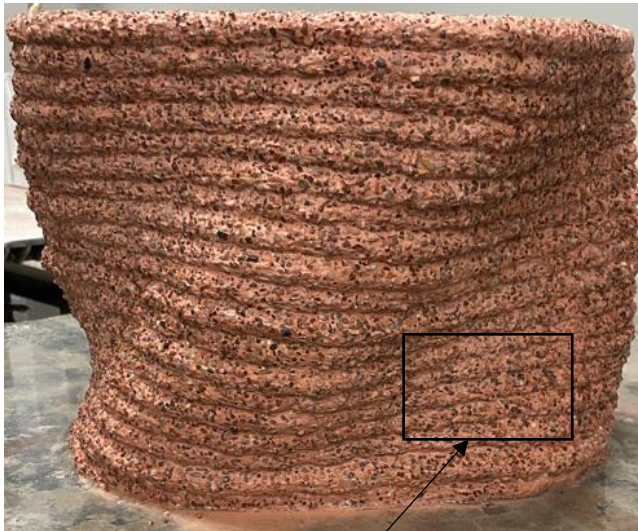
время печати объектов, смесь, находившаяся в состоянии перекачивания, сохранила свои первоначальные технологические свойства.

Объекты, полученные методом строительной 3D-печати на опытно-промышленной производственной площадке ФГБОУ ВО «ВГТУ» на отечественном технологическом комплексе строительной 3D-печати производства компании ООО «КЕЙКОД» представлены на рисунках 5.3 и 5.4.

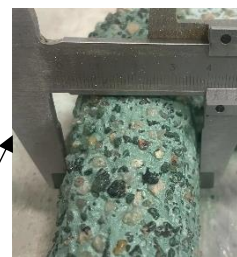


Рисунок 5.3 – Объекты, изготовленные методом экструзионной безопалубочной печати из смесей с заполнителем размером $D = 160-1250$ мкм

Обеспечение качественного слоя доказано отсутствием дефектов: отсутствуют расплыв и наплыв в месте поворота траектории печати, отсутствуют разрывы смеси в слое, отсутствуют локальные дефекты (пустоты, каверны, рытвины, гребни), нет значительного изменения высоты печатных слоев.



Высота слоев от 3 до 19 составляет
12-14 мм, при заданной в G-code
высоте слоя 13 мм.



слой 3

ширина 41 мм



слой 4

ширина 40,5 мм



слой 5

ширина 39 мм

слои 1 и 2 по ширине соответствуют 3 слою

Рисунок 5.4 – Объекты, изготовленные методом экструзионной безопалубочной печати из смесей с заполнителем размером $D = 630-5000$ мкм

Для смесей с наполнителем с размером частиц $D = 160-1250$ мкм была доказана возможность экструзии качественных слоев с незначительным изменением высоты нижних слоев. Высота слоев по всей высоте изделия составляет 14-15 мм, при заданной – 15 мм, кроме первого слоя, имеющего высоту 12 мм, что связано с программными особенностями G-code и не влияет на конечный вид изделия.

Смеси на наполнителях с размерами частиц $D = 630-5000$ мкм также обеспечивают устойчивую печать до 20 слоев, при этом деформации минимальны и существенного изменения слоя по высоте печатного изделия не наблюдается. Изменение высоты слоя при печати «вазона» обусловлена не только реологическим поведением применяемого материала, но и выбранным режимом печати – непрерывная траектория с постоянным поднятием сопла (печать по спирали, нет деления на отдельные плоские слои). При печати декоративного элемента был также получен целостный слой, не имеющих значительных деформаций по высоте слоя, однако стоит отметить изменение ширины слоя. При нагружении слоев, сформированных круглым соплом экструдера, их ширина изменяется в пределах 5 % от первоначально сформированного геометрического размера, при этом изменение размеров слоя прекращается после нагружения двумя слоями.

Разработанные составы смесей подтвердили свою пригодность к печати и применимость при апробации на промышленном принтере. При их использовании обеспечивается создание качественного бездефектного слоя, получение устойчивой формы высотой до 20 печатных слоев и достижение декоративных эффектов за счет введения в состав наполнителей различного цвета с крупностью зерен 1,6-5 мм.

5.1.3 Рекомендации по технологии изготовления строительных изделий методом 3D-печати

Процесс изготовления методом строительной 3D-печати включает следующие технологические этапы:

- 1) Моделирование объектов печати.

- 2) Подготовка оборудования к печати.
- 3) Приготовление смеси для печати.
- 4) Процесс экструзионной безопалубочной печати.

Моделирование объектов печати. Моделирование объекта выполняется в любом графическом редакторе, имеющем техническую возможность создания САД-модели изделия с заданными геометрическими размерами. Дальнейшая работа с моделью происходит в программном комплексе «SuperSlicer» версии 2.7.62.0, позволяющем разделить модель на отдельные плоские слои (см. рис. 5.1, б).

После получения набора плоских моделей и задания основных параметров режима печати (скорость печати, скорость вращения шнека, высота слоя, определяемая как расстояние между соплом и предыдущим слоем или поверхностью основания печати) определяется траектория движения головки экструдера принтера (см. рис. 5.1, в) по центру тяжести печатного слоя, описываемая G-code, понятным принтеру для осуществления печати. G-code представляет собой набор координат, определяющих положение головки экструдера принтера в пространстве, и команд для выполнения задач, таких как, подача смеси, пауза, скорость передвижения, скорость вращения шнека и др.

Возможность получения качественного напечатанного объекта, определяется рядом условий:

- траектория печатного слоя должна быть непрерывной, без пересечения;
- места контакта (см. рис. 5.1, б) должны быть заданы с учетом ширины печатного слоя;
- ширина печатного слоя определяется размером сопла экструдера и объемом выходящей смеси, задаваемым производительностью принтера, а именно его скоростью печати и скоростью вращения подающего шнека;
- высота печатного слоя не должна превышать возможности смеси сохранять свою форму.

Подготовка оборудования к печати. Перед началом процесса печати выполняют предварительную настройку принтера. Подготовленная ранее управляющая

программа (G-code) запускается на оборудовании в «холостом» режиме для проверки траектории печати и корректности работы каждой команды, прописанной в коде, а также в выбранной зоне работы принтера производят подготовку основания для будущего изделия. По результатам выставленной платформы для объекта печати определяют базовую точку – пересечение осей координат ($x = 0$, $y = 0$, $z = 0$).

Перед началом печати смесью необходимо запустить в систему пуско-наладочную смесь для создания на всех внутренних поверхностях смазочного слоя. Данный слой обеспечивает сохранность технологических свойств смесей, предназначенных для экструзионной безопалубочной печати, и предотвращает эффекты заклинивания и образования пробок при трении смеси о сухие поверхности рабочих частей принтера.

Подготовка смеси для печати. В качестве вяжущих для приготовления мелкозернистой смеси, применяемой в технологии строительной 3D-печати следует применять портландцемент по ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия», белый цемент по ГОСТ 965-89 «Портландцементы белые. Технические условия».

В качестве заполнителя для приготовления мелкозернистой смеси, применяемой в технологии строительной 3D-печати следует использовать полифракционные природные материалы с размерами частиц от 0,16 мм до 5 мм, соответствующие ГОСТ 8736-2025 «Песок для строительных работ. Технические условия», декоративные заполнители (гранит орех, сланец терракотовый и др.) по ГОСТ 22856-89 «Щебень и песок декоративные из природного камня. Технические условия».

Химические добавки и модификаторы вязкости, применяемые для регулирования способности смеси к экструзии и последующей сохранности формы должны удовлетворять ГОСТ 24211-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия». Расход химических добавок и модификаторов вязкости должен назначаться в зависимости от вида применяемого вяжущего и уточняться опытным путем.

Пигменты, применяемые для получения смеси заданной колористики, должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 56585-2015 «Пигменты для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия». Расход пигмента принимается в зависимости от степени интенсивности получаемого оттенка и уточняется опытным путем.

Вода должна удовлетворять требованиям ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и растворов строительных».

Подбор состава мелкозернистой смеси, применяемой в технологии строительной 3D-печати должен производиться с обеспечением заданных пластичности, агрегативной устойчивости и структурной прочности смесей, а также с учетом характеристик применяемых сырьевых материалов.

Подбор состава мелкозернистой смеси для опытных замесов должен назначаться с учетом исходных значений массового соотношения цементного вяжущего и заполнителя, принимаемого от 1 : 1,1 до 1 : 1,4.

Уточнение массового соотношения производится с учетом фракционного состава заполнителя, плотности упаковки его частиц и плотности применяемой цементной матрицы.

Расход пластифицирующей добавки не должен превышать 1,2 % от массы цемента.

Расход модифицирующих добавок зависит от их вида, но не более 3 % от массы цемента.

Приготовление смесей начинают с определения требуемого объема компонентов, необходимых для печати заданного изделия и создания запаса, необходимого для корректной работы принтера и печати качественного слоя. В зависимости от объема смеси, приготовление может быть разделено на несколько этапов.

После подготовки компонентов производят непосредственное приготовление смеси путем предварительного перемешивания сухих компонентов смеси (портландцемент, мелкозернистый заполнитель, пигмент, сухой модификатор) в

высокоскоростном смесителе и подготовки затворителя (вода, жидкий модификатор, суперпластифицирующая добавка). Затем подготовленный затворитель вводят в смеситель и перемешивают в течении трех минут.

Перед началом печати отбирают пробу сырьевой смеси для проведения испытаний по определению ее способности к экструзии и сохранности формы. Если характеристики смеси не соответствуют заданным, не обеспечены технологические параметры ($P_{пл}$), то необходимо откорректировать В/Ц отношение до достижения заданных значений $P_{пл} = 1,0-2,5$ кПа.

Процесс 3D-печати. По достижении требуемых технологических характеристик смеси выполняют её транспортировку в экструдер и приступают к печати. В процессе работы обеспечивают непрерывную подачу материала со скоростью равной скорости расхода при печати.

В процессе печати производят визуальный контроль качества и размера печатного слоя, при необходимости корректируют скорость вращения шнека для достижения требуемых параметров печатного слоя.

При визуальном контроле проверяют отсутствие основных дефектов печатного слоя: расплыв, нарушение целостности (разрывы, раковины, чрезмерная пористость), наплывы в местах изменения траектории печати, изменение высоты слоя при нагружении вышележащими слоями.

После окончания печати производится отверждение изделия и осуществляется уход за бетоном путем его периодического увлажнения.

Транспортировка и монтаж полученных изделий производится после набора бетоном не менее 50 % от проектной прочности и не ранее чем через 1 сутки.

5.2 Технико-экономическая эффективность разработок

Для оценки технико-экономической эффективности 3D-печати при производстве различных элементов благоустройства из мелкозернистых бетонов запроюктированных составов произведен расчет затрат на выпуск изделий с учетом цен и тарифов, действующих на 2026 год; выполнено сравнение стоимости смесей и изделий с аналогами.

Для расчета стоимости производства принят отечественный принтер компании ООО «КЕЙКОД» (см. рис. 2.3). Конструкция принтера – порталная, рабочая поверхность 2×6 м, с возможностью перемещения поддонов после печати при наборе минимальной прочности изделий. Принтер оснащен автоматической системой подачи компонентов и замешивания смеси, что позволяет получить качественную смесь непосредственно на производстве. Производительность принтера составляет 630 килограмм смеси в час, при рабочей смене в 8 часов, из которых 1 час – подготовительные работы, 6 часов – печать, 1 час – технический, потребление в смену составит 3,78 тонны. При двухсменной работе принтера, потребление смеси в день составит 7,56 тонн. Из расчета 247 рабочих дней в году, потребление – 1867,32 тонн в год. При этом сухой смеси для приготовления раствора необходимо – 1 638 тонн, воды – 229,32 тонны или м^3 . С учетом средней плотности раствора 2100 кг/м^3 и емкости материала в теле изделия 0,37 производительность принтера – $2615 \text{ м}^3/\text{год}$.

На первом этапе, с учетом расхода (таблица 5.2), был выполнен расчет стоимости сырьевых материалов для изготовления смесей разработанных составов, исходя из их рыночной стоимости (таблица 5.3).

Для расчета затрат на производство печатных изделий и их себестоимости необходимо произвести расчет затрат на водоснабжение, теплоснабжение, электроэнергию, а также затраты на заработную плату, социальные и амортизационные отчисления, налоги (таблица 5.4).

Калькуляция статей затрат на производство годового объема продукции представлена в таблице 5.5.

Таблица 5.2 – Расход материалов на 1 м³ мелкозернистого бетона для строительной 3D-печати

Наименование материала	Расход материала, кг (л)/м ³			
	3D.A.TI.B60	3D.A.TII.B55	3D.A.TIV.B60	3D.A.TV.B45
Портландцемент СЕМ I 42,5R	—	—	—	—
Портландцемент СЕМ I 52,5R	888	860	858	861
Вода	284	301	300	301
Пластифицирующая добавка (Sika® ViscoCrete® T100)	10,6	10,3	10,3	10,3
Модифицирующая добавка (БМК-45)	—	—	—	—
Модифицирующая добавка (Камедь FUFENG® 80)	1,8	1,7	1,7	1,7
Модифицирующая добавка (жидкое стекло)	1,8	1,7	1,7	1,7
Пигмент красный (TP-303)	—	—	1,7	—
Пигмент зеленый (Deqing tongchem)	—	—	—	1,7
Песок кварцевый	1110	—	—	—
Гранит орех	—	1076	858	861
Сланец терракотовый	—	—	215	—
Змеевик	—	—	—	215

Таблица 5.3 – Расчет стоимости затрат на сырье для изготовления смеси

Наименование сырья, материалов, полуфабрикатов	Ед. изм.	Заготовительная цена, р	Норма расхода на 1 т продукции	Норма смеси	Расход на тонну смеси	
					нат. ед.	рублей
Цемент-Песок						
Цемент	т	20 000	0,446	1	0,446	8923
Песок	т	930	0,547		0,547	508
Камедь	т	500 000	0,001		0,001	437
Суперпластификатор	т	140 000	0,005		0,005	750
Добавка натриевая	т	60 800	0,001		0,001	53
ИТОГО:						10 672
Цемент-Гранит Орех						
Цемент	т	20 000	0,446	1	0,446	8923
Гранит Орех	т	12 000	0,547		0,547	6561
Камедь	т	500 000	0,001		0,001	437
Суперпластификатор	т	140 000	0,005		0,005	750
Добавка натриевая	т	60 800	0,001		0,001	53
ИТОГО:						16 725
Цемент-Пигмент красный-Гранит Орех-Сланец						
Цемент	т	20 000	0,451	1	0,451	9014
Гранит Орех	т	12 000	0,433		0,433	5194
Сланец	т	12 000	0,108		0,108	1298
Камедь	т	500 000	0,001		0,001	460
Пигмент красный	т	200 000	0,001		0,001	184
Суперпластификатор	т	140 000	0,006		0,006	773
Добавка натриевая	т	60 800	0,001		0,001	56
ИТОГО:						16 978

Продолжение таблицы 5.3

Наименование сырья, материалов, полуфабрикатов	Ед. изм.	Заготовительная цена, р	Норма расхода на 1 т продукции	Норма смеси	Расход на тонну смеси	
					нат. ед.	нат. ед.
Цемент-Пигмент красный-Гранит Орех-Змеевик						
Цемент	т	20 000	0,448	1	0,448	8956
Гранит Орех	т	12 000	0,435		0,435	5223
Змеевик	т	14 000	0,109		0,109	1524
Камедь	т	500 000	0,001		0,001	449
Пигмент зеленый	т	300 000	0,001		0,001	269
Суперпластификатор	т	140 000	0,005		0,005	754
Добавка натриевая	т	60 800	0,001		0,001	55
ИТОГО:						17 230

Таблица 5.4 – Расчет материальных затрат, затрат на воду и энергоресурсы

Назначение расходов	Заготовительная цена, р./м ³ (р./т)	Норма расхода на 1 м ³ продукции, м ³ (т, кг)	Годовой объем производства продукции, м ³	Расход на годовую программу	
				м ³ (т, кг)	тыс. р.
Затраты на сухую смесь 3D.A.TIЭ.B60, т	10 672	0,626	1 115	698	7 448,9
Затраты на сухую смесь 3D.A.TII.B55, т	16 725		500	313	5 234,9
Затраты на сухую смесь 3D.A.TIV.B60, т	16 978		500	313	5 314,1
Затраты на сухую смесь 3D.A.TV.B45, т	17 230		500	313	5 393,0
Затраты на расходные материалы	250	1	2 615	2615	653,8
Расход воды на технологические нужды, м ³	22,91	1,5		3923	89,9
Расход воды на общехозяйственные цели, м ³	22,91	0,5		1308	30,0
Расход теплоносителя на отопление и другие нужды, т	1 500	0,2		523	784,5
Электроэнергия на технологические цели	6,1	40		104 600	638,1
Электроэнергия на освещение и другие внепроизводственные цели	6,1	40		104 600	638,1

Для определения цены на единицу товара был выполнен анализ стоимости малых архитектурных форм, изготовленных различными способами (таблицы 5.6 и 5.7).

Таблица 5.5 – Годовые затраты на производство и себестоимость единицы продукции

Наименование статей затрат	Характер затрат	Затраты по видам продукции, напечатанной из смеси								Общие за- траты на годовую программу, тыс. р.
		3D.A.TIЭ.B60		3D.A.TII.B55		3D.A.TIV.B60		3D.A.TV.B45		
		На единицу, р/м³	На годовой объем, тыс.р.	На единицу, р/м³	На годовой объем, тыс.р.	На единицу, р/м³	На годовой объем, тыс.р.	На единицу, р/м³	На годовой объем, тыс.р.	
1. Материальные затраты										
1.1 На основное производство	переменные	6680,7	7448,9	10469,9	5234,9	10628,2	5314,1	10786,0	5393,0	23391,0
1.2 На воду	переменные	45,9	51,2	45,9	22,9	45,9	22,9	45,9	22,9	120,0
1.3 На обслуживание пр-ва	переменные	668,1	744,9	1047,0	523,5	1062,8	531,4	1078,6	539,3	2339,1
1.4 На энергоресурсы										
Теплоноситель на отопление и др.	постоянные	300,0	334,5	300,0	150,0	300,0	150,0	300,0	150,0	784,5
Электроэнергия на производство	переменные	244,0	272,1	244,0	122,0	244,0	122,0	244,0	122,0	638,1
Электроэнергия на освещение	постоянные	244,0	272,1	244,0	122,0	244,0	122,0	244,0	122,0	638,1
2. Заработная плата										
Основных рабочих (8 человек)	переменные	3778,2	4212,7	3778,2	1889,1	3778,2	1889,1	3778,2	1889,1	9880,0
АУП (3 человека)	постоянные	1889,1	2106,3	1889,1	944,6	1889,1	944,6	1889,1	944,6	4940,0
3. Отчисления на социальные нужды (30 % ЗФ)										
Основных рабочих	переменные	1133,5	1263,8	1133,5	566,7	1133,5	566,7	1133,5	566,7	2964,0
АУП	постоянные	566,7	631,9	566,7	283,4	566,7	283,4	566,7	283,4	1482,0
4. Накладные расходы	переменные	2833,7	3159,5	2833,7	1416,8	2833,7	1416,8	2833,7	1416,8	7410,0
5. Амортизационные отчисления										
по оборудованию (15 %)	постоянные	372,8	415,7	372,8	186,4	372,8	186,4	372,8	186,4	975,0
по зданиям (2 %)	постоянные	26,8	29,8	26,8	13,4	26,8	13,4	26,8	13,4	70,0
6.1 Налог на землю	постоянные	1,7	1,9	1,7	0,9	1,7	0,9	1,7	0,9	4,5
6.2 Налог на загрязнение	постоянные	3,0	3,3	3,0	1,5	3,0	1,5	3,0	1,5	7,8
7. Прочие затраты	постоянные	1063,9	1186,3	1063,9	532,0	1063,9	532,0	1063,9	532,0	2782,2
	Всего	19852,0	22135,0	24020,1	12010,1	24194,3	12097,2	24367,9	12183,9	58426,2
	переменные	15383,9	17153,1	19552,0	9776,0	19726,3	9863,1	19899,8	9949,9	46742,1
	постоянные	4468,1	4981,9	4468,1	2234,0	4468,1	2234,0	4468,1	2234,0	11684,1

Таблица 5.6 – Сравнение стоимости объектов, имеющих текстуру искусственного камня

Наименование компании	Расчет по разработанным смесям	Архитек-бетон	Vazon.ru	ГрильРок	Notabeton	Куб бетона
Характеристика технологии	3D-печать	Литье в формы (предполагает наличие одноразовой опалубки)				Литье и вибро-прессование
Ассортимент	Вазоны, урны, скамейки, МАФ	Вазоны, урны, скамейки	Вазоны, урны, скамейки, столбики ограждения	Вазоны, урны, скамейки	Вазоны, урны, скамейки, МАФ	Вазоны, скамейки, МАФ, элементы домашнего декора
Применяемые материалы	Разработанные мелкозернистые цементные смеси	Бетонные смеси с каменной крошкой	Бетон с покрытием	Бетонные смеси с каменной крошкой	Бетонные смеси с каменной крошкой	Архитектурный бетон, стеклофибробетон
Вид производства	Серийное/Заказ	Серийное	Серийное	Серийное	Серийное/Заказ	Серийное/Заказ
Варианты визуальных решений	4 (запроектированные составы смесей)	2	5	20	6	20
Фото изделия	 26 × 26 × 25 см	 60 × 60 × 50 см	 30 × 40 × 40 см	 40 × 40 × 45 см	 40 × 40 × 32 см	 d=25 см, h=50 см
Объем материала в изделии	0,37	0,55	0,30	0,67	0,45	0,67
Стоимость изделия, т.р./м ³	79,9	79,9	106,3	111,1	137,1	480

Таблица 5.7 – Сравнение стоимости объектов, изготовленных методом строительной 3D-печати

Наименование компании	Расчет по разра- ботанным смесям	PRINTBETON36	БетоникАрт	Основание	Лерто	RVS3D
Характеристика технологии	3D-печать	3D-печать				3D-печать с пропариванием
Ассортимент	Вазоны, урны, скамейки, МАФ	Вазоны, грядки, урны, скамейки, ограждения	Вазоны, урны, ограждения, скамейки	Несъёмная опалубка, МАФ клумбы, вазоны, скамейки	Вазы, кашпо, фигуры, статуи, арт-объекты, МАФ	Вазы, кашпо, фигуры, статуи, арт-объекты, МАФ
Применяемые материалы	Разработанные мелкозернистые цементные смеси	Облегченный бетон	Авторские цементные смеси	Авторские цементные смеси	Авторские цементные смеси	Авторские цементные смеси
Вид производства	Серийное/Заказ	Заказ	Серийное/Заказ	Серийное/Заказ	Серийное/Заказ	Серийное/Заказ
Варианты визуальных решений	4 (запроектированные составы смесей)	5	2	3	8	4
Фото изделия	 65 × 90 × 18 см	 40 × 40 × 50 см	 100 × 60 × 35 см	 d=40 см, h=40 см	 d=40 см, h=35 см	 30 × 30 × 30 см
Объем материала в изделии	0,37	0,34	0,34	0,33	0,38	0,45
Стоимость изделия, т.р./м ³	56,3	56,3	83,8	120,0	125,0	240,7

Для сравнения в табл. 5.6 был принят вазон, изготовленный из смеси с мелким заполнителем гранит орех и сланец, имеющей привлекательную текстуру, похожую на туф, а изделие по визуальным эффектам сопоставимы с теми, что представлены на рынке. При сравнении цены на объекты, изготовленные методом строительной 3D-печати, был принят элемент благоустройства «Лошадь» (см. табл. 5.7), изготовленной из смеси на основе белого цемента и рядового кварцевого песка.

Для дальнейшего расчета в качестве отпускной цены за 1 м³ изделия принимаем минимальную цену производителей, вошедших в сравнение.

Окончательная стоимость продукции с учетом среднерыночной цены на изделия аналоги определена в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Годовая стоимость продукции и валовая прибыль предприятия

Наименование смеси для 3D-печатных изделий	Ед. изм.	Себестоимость, р./ м³	Отпускная цена, р./ м³	Годовой объем пр-ва, м³	Затраты на пр-во, тыс.р.	Стоимость продукции, тыс.р.	Валовая прибыль, тыс.р.
3D.A.TIЭ.B60	м³	19 852,0	56 300,0	1 115	22 135,0	62 776,5	40 639,5
3D.A.TII.B55		24 020,1	79 900,0	500	12 010,1	39 950,0	27 939,9
3D.A.TIV.B60		24 194,3	79 900,0	500	12 097,2	39 950,0	27 852,8
3D.A.TV.B45		24 367,9	79 900,0	500	12 183,9	39 950,0	27 766,1
Итого:				2 615	58 426,2	182 624,5	124 198,3

Определение рентабельности производства выполнено на основании расчета точки безубыточности, определяемой по формуле 5.1:

$$Q_{min} = \frac{Z_{\text{пост}}^{\text{год}}}{C_{\text{ед}} - Z_{\text{пер}}^{\text{ед}}} \quad (5.1)$$

где $Z_{\text{пост}}^{\text{год}}$ - величина годовых постоянных затрат на производство, р.,
 $Z_{\text{пер}}^{\text{ед}}$ - средняя величина переменных затрат на единицу продукции, р./м³,
 $C_{\text{ед}}$ - средняя цена единицы продукции, р./м³.

При средней цене за единицу продукции 69 837,3 рублей и постоянных и переменных затратах, представленных в таблице 5.4, на основании расчета точки безубыточности, минимальный годовой объем выпускаемой продукции составляет 225 м³, что меньше принятого объема в 2 615 м³ – выпуск продукции рентабелен. На рисунке 5.5 представлен график точки безубыточности.

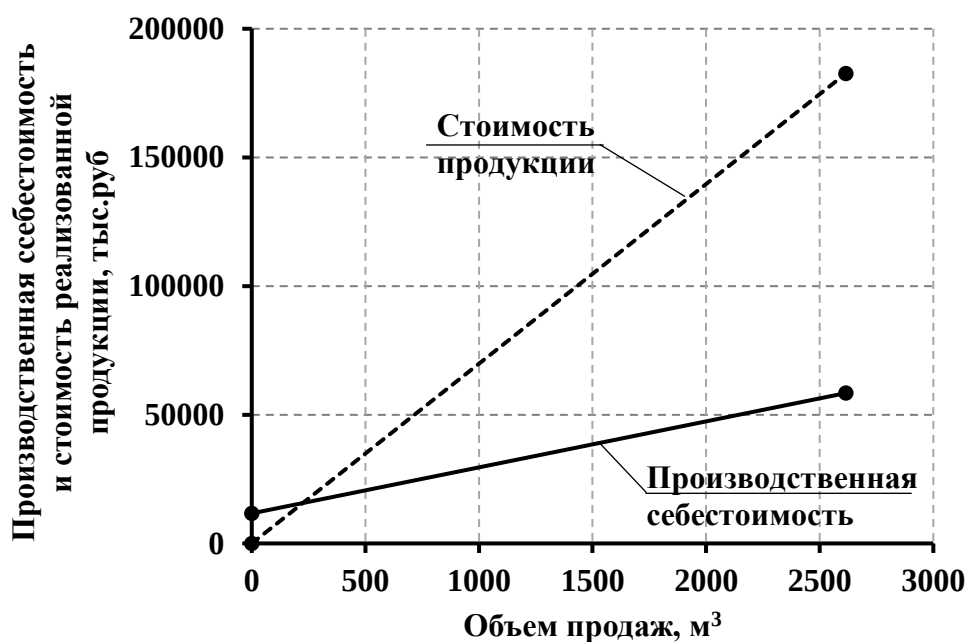


Рисунок 5.5 – График точки безубыточности

В таблице 5.9 приведен перечень и данные расчета действующих налогов. Основные фонды (здания и оборудования) приняты из учета стоимости выбранного для расчета принтера производства компании ООО «КЕЙКОД» с рабочей площадкой 2 × 6 метров на 2026 год и составляет 6 500 000 рублей, помещение 90 м² для производства – 3 500 000 рублей.

Таблица 5.9 – Перечень и численные значения налогов из прибыли, отчисляемые в федеральный и местные бюджеты

Вид налога	Нормативное значение и схема расчета налогов	Численные значения, тыс. р.
На имущество	2,2 % от стоимости основных фондов	220,0
Налог на прибыль	25 % от остатка балансовой прибыли	30 994,6
Всего		31 214,6

Чистая прибыль при устойчивой работе производственного участка по строительной 3D-печати при валовой прибыли предприятия 124 198,3 тыс.р. (см. табл. 5.8) и налогообложении 31 214,6 тыс.р. (см. табл. 5.9) составляет 92 983,7 тыс.р.

Оборотные средства предприятия определены в таблице 5.10. При данной величине оборотных средств коэффициент оборачиваемости за год – 58 раз, длительность одного оборота – 8 дней.

Таблица 5.10 – Оборотные средства предприятия по производству печатных бетонных объектов

Наименование групп и элементов оборотных средств	Оборот, тыс.р.		Норматив запаса, сутки	Оборотные средства по группам и элементам, тыс.р.
	годовой	суточный		
Нормируемые				
1. Производственные запасы:				
Смесь ЦМ-П	7 448,9	20,7	10	206,9
Смесь ЦМ-ГО	5 234,9	14,5	10	145,4
Смесь ЦМ-ПК-ГО-СЛ	5 314,1	14,8	10	147,6
Смесь ЦМ-ПЗ-ГО-З	5 393,0	15,0	10	149,8
Расходные материалы	653,8	1,8	60	109,0
запчасти (10 % от стоимости оборудования)	650,0	1,8	75	135,4
малоценный инструмент и инвентарь (4 % от стоимости оборудования)	260,0	0,7	60	43,3
2. Незавершенное производство			0,5	56,2
3. Готовая продукция на складе	58 426,2	162,3	10	1 623,0
Итого нормируемых оборотных средств:				2 616,6
Ненормируемые				
1. Отгруженная неоплаченная продукция	20 % от стоимости нормируемых оборотных средств			523,3
2. Средства в расчетах и на счетах в банках				
Итого ненормированных оборотных средств:				523,3
Всего оборотных средств:				3 139,9

Эффективность инвестиционного проекта оценивается исходя из допущения, что он реализуется одним инвестором за счет собственных средств. До запуска производства объем вложений определяется потребностью приобретения или строительства производственных помещений, а также приобретение оборудования, запуск производства продукции начинается с мощности производства 70 % от проектной, на второй год работы предприятие выходит на устойчивое производство

(проектная мощность). Расчет чистого дисконтированного дохода от реализации инвестиционного проекта представлен в таблице 5.11, график окупаемости проекта на рисунке 5.6.

Таблица 5.11 – Расчет чистого дисконтированного дохода от реализации инвестиционного проекта при ставке рефинансирования ЦБ РФ 14 %

Наименование показателя	Значение показателей по месяцам, млн.руб			
	1	2	3	4
Инвестиционная деятельность				
Объем инвестиций (Kt)	13,14	-	-	-
Производственная деятельность				
Стоимость реализованной продукции (Pt)	-	10,7	10,7	10,7
Производственная себестоимость (Зt)	-	3,4	3,4	3,4
Валовая прибыль (Пt)	-	7,2	7,2	7,2
Налоги (Нt)	-	1,8	1,8	1,8
Чистая прибыль (ЧПt)	-	5,4	5,4	5,4
Амортизация (At)	-	0,08	0,08	0,08
Чистый доход (ЧДt)	-13,14	5,5	5,5	5,5
Коэффициент дисконтирования (αt)	-	1	1	1
Дисконтированный поток денежных средств (ДПДt)	-13,14	5,51	5,51	5,51
Чистый дисконтированный доход (ЧДДt)	-13,14	-7,63	-2,13	3,38

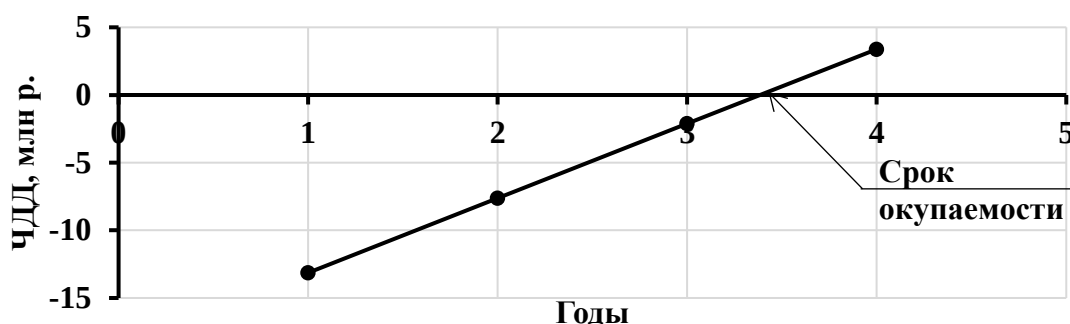


Рисунок 5.6 – График окупаемости инвестиционного проекта

График точки безубыточности (см. рис. 5.5) и расчет чистого дисконтированного дохода подтверждают финансовую устойчивость проекта.

В результате использования отечественного оборудования, рационального его размещения и применения смесей по запроектированным составам, изготовленным непосредственно на производстве печати, обеспечено производство со сроком окупаемости 3,5 месяца.

Уровень рентабельности продукции при условии изготовления архитектурных объектов из смесей, полученных из сырьевых материалов непосредственно на производстве печати, составляет 159 %.

При устойчивом развитии рынка строительных материалов для аддитивных технологий, возможен переход на печать покупными составами смесей. С учетом рыночной цены на мелкозернистые цементные смеси уровень рентабельности такого производства составит 63 %, при этом срок окупаемости – 5 месяцев.

5.3 Выводы по главе 5

1 Подтверждена возможность масштабирования разработок для промышленного применения. При изготовлении изделий на промышленном 3D-принтере из мелкозернистых цементных смесей разработанных составов обеспечена воспроизводимость заданных технологических характеристик, бездефектность и постоянство сечения экструзионных слоев, формоустойчивость напечатанных изделий при непрерывной укладке не менее 20 слоев.

2 Разработан и апробирован на заводе сухих строительных смесей ООО «СТРОЙСАНТЕХМОНТАЖ» технологический регламент производства сухих строительных смесей для строительной 3D-печати. При производстве опытной партии смеси подтверждена возможность производства строительных смесей разработанных составов на типовом оборудовании.

3 Предложены технологические рекомендации по изготовлению строительных изделий методом 3D-печати, включая требования к моделированию объектов, подготовке оборудования, приготовлению смеси и процессу печати, которые внедрены в производственном цехе предприятия ООО «БетоникАРТ».

4 Технико-экономическая эффективность производства малых архитектурных форм методом 3D-печати с применением разработанных составов декоративных бетонов зависит от стоимости сырья и оценивается следующими показателями: срок окупаемости вложений 3,5-5 месяцев, уровень рентабельности продукции 65-160 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования.

1. Расширение применения строительных аддитивных технологий сдерживается ограниченным предложением на рынке доступных и универсальных материалов. Проблема заключается в том, что отсутствуют общепризнанные универсальные методы и подходы, в том числе нормированные, которые позволили бы независимо от параметров оборудования и с учетом конкретных свойств сырья целенаправленно проектировать составы бетонов с особыми технологическими свойствами, обеспечивающими их применимость к условиям экструзионной безопалубочной строительной 3D-печати.

2. Концепция исследования заключается в том, что проектирование составов мелкозернистых цементных бетонов для 3D-печати, отличающихся особыми технологическими свойствами экструдируемости и формоустойчивости, базируется на учете данных свойств. Методика проектирования основана на экспериментально установленной взаимосвязи параметров состава и структуры с реологическим поведением, технологическими свойствами готовых к употреблению смесей как вязко-пластичных систем в динамических условиях экструзии и статических условиях послойной укладки. В качестве главного критериального параметра структуры, обеспечивающего технологические свойства смесей, принято отношение толщины прослойки цементной матрицы к среднему диаметру частиц заполнителя.

3. Установлено, что рациональными реологическими характеристиками по показателям оценки предела пластичности 1,0-2,5 кПа, структурной прочности 1-3 кПа; технологической характеристике пластической прочности 1,0-2,5 кПа, обеспечивающими экструдируемость и формоустойчивость, обладают системы на заполнителе полифракционного состава. Для обеспечения данных характеристик установлено, что концентрация заполнителя в составе смеси должна находиться в диапазоне 110-140 % от массы цемента. Смеси, изготовленные с использованием заполнителя монофракционного состава, характеризуются как жесткие по типу реологического поведения, демонстрируют неспособность к вязкопластическому

течению с неразрушенной структурой, что определяет их технологическую непригодность к печати из-за невозможности формирования бездефектного слоя в процессе экструзии.

4. Технологические характеристики мелкозернистой цементной смеси определяются реологическим поведением цементной матрицы. Для обеспечения технологической пригодности к 3D-печати (пластичности и формоустойчивости) модели реологического поведения мелкозернистой смеси и цементной матрицы должны быть сходными, смеси должны обладать способностью к вязкопластическому течению без разрушения структуры. Экспериментально доказано, что для реализации данного условия отношение толщины прослойки цементной матрицы к среднему диаметру частиц заполнителя должно быть в диапазоне значений 0,15-0,21.

5. Получены экспериментально-статистические зависимости «параметры состава и структуры – реологические характеристики смесей» как основа для проектирования составов бетонов. На основании данных зависимостей определены граничные значения варьирования объемных долей цементной матрицы и заполнителя в диапазоне 1,2-1,5; соотношений массы заполнителя к массе цемента – 1,1-1,4.

6. Разработана методика проектирования составов мелкозернистых бетонов для строительной 3D-печати, включающая следующие шаги: экспериментальное определение характеристик исходного заполнителя, корректировка состава заполнителя, подбор состава цементной матрицы по технологическим характеристикам и задаваемым прочностным показателям бетона, расчет характеристик заполнителя (средний диаметр частиц и плотность упаковки частиц), определение требуемой толщины прослойки цементной матрицы, определение объемного соотношения элементов структуры смеси, расчет массовых соотношений цементной матрицы и заполнителя, экспериментальное подтверждение технологических характеристик мелкозернистой смеси и проверка на соответствие заданной прочности бетона запроектированного состава.

7. На основании разработанной методики запроектировано четыре состава декоративного бетона для 3D-печати с имитацией текстуры искусственного

камня. В результате экспериментальной и опытно-промышленной апробации доказано, что смеси на их основе характеризуются технологической пригодностью к печати по показателям пластической прочности 1,2-2,4 кПа, сохранности работоспособности в течение 30-40 мин. При печати изделий обеспечивается бездефектность и постоянство сечения экструзионных слоев, формоустойчивость напечатанных изделий при непрерывной укладке не менее 20 слоев. Декоративные бетоны характеризуются следующими показателями: прочность в первые сутки 36-48 МПа, в 28 суток – 54-68 МПа, после 1 года – более 70 МПа; водопоглощение менее 1 %, морозостойкость 200 циклов, деформации влажностной усадки 1,3-1,7 мм/м. Это позволяет прогнозировать высокий потенциал эксплуатационной стойкости и долговечности изделий из бетонов на основе разработанных составов.

8. Разработан и внедрен в производство на ООО «СТРОЙСАНТЕХМОНТАЖ» технологический регламент производства сухих строительных смесей для строительной 3D-печати. При выпуске опытной партии сухой смеси подтверждена возможность производства строительных смесей разработанных составов на типовом оборудовании без переналадки. Предложены технологические рекомендации по изготовлению строительных изделий методом 3D-печати, включая требования к моделированию объектов, подготовке оборудования, приготовлению смеси и процессу печати, которые внедрены в производственном цехе предприятия ООО «БетоникАРТ».

9. Техничко-экономическая эффективность производства малых архитектурных форм методом 3D-печати с применением разработанных составов декоративных бетонов зависит от стоимости сырья и оценивается сроком окупаемости вложений 3,5-5 месяцев, уровнем рентабельности продукции 65-160 %.

Рекомендации по использованию результатов работы.

Предложенная методика проектирования составов мелкозернистых бетонов и технологический регламент производства сухих строительных для 3D-печати рекомендуется к использованию на заводах сухих строительных смесей.

Рекомендации по технологии изготовления строительных изделий методом 3D-печати могут быть использованы при цеховом производстве строительных изделий.

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с развитием предложенных теоретических подходов и прикладных технологических решений для расширения номенклатуры бетонов для 3D-печати с применением различных видов вяжущего и заполнителя. Особый интерес вызывают исследования по созданию бетонов специального назначения, в том числе гидротехнических, жаростойких и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамцевич Л. А. Аддитивное строительное производство: прошлое, настоящее, будущее // Жилищное строительство. – 2024. – № 8. – С. 3-10.
2. Адамцевич А. О., Адамцевич Л. А., Пустовгар А.П. Аддитивное строительное производство: обзор мирового опыта // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 12. – С. 83-97.
3. Галишникова В. В., Коренева А.И. Техничко-экономическое сравнение строительства зданий с применением аддитивной и традиционной технологий производства // Строительное производство. – 2025. – № 2. – С. 118-127.
4. Гранева А. В., Васечко Е. В. Аддитивные технологии в строительстве: потенциал внедрения в гражданское строительство // Строительное производство. – 2025. – № 2. – С. 151-157.
5. Иноземцев А. С. Современная теория и практика технологии бетонов для 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 2. – С. 216-245.
6. Ривкин С. Г., Недосеко И. В. Аддитивные технологии в строительстве // В сборнике: Проблемы строительного комплекса России. Материалы XXVII Всероссийской научно-технической конференции, посвященной памяти профессора В.В. Бабкова. – Уфа, 2023. – С. 278-279.
7. Al Rashid A.; Khan S. A.; Al-Ghamdi S. G.; Koç M. Additive manufacturing: Technology, applications, markets, and opportunities for the built environment // Automation in Construction. – 2020. – Vol. 118. – P. 103268.
8. Cao X., Yu S., Cui H., Li Z. 3D printing devices and reinforcing techniques for extruded cement-based materials: a review // Buildings. – 2022. – Vol. 12, № 4. – P. 453.
9. Raphael B., Senthilnathan S., Patel A., Bhat S. A review of concrete 3D printed structural members // Frontiers in Built Environment. – 2023. – Vol. 8. – P. 1034020.
10. Refati Md. F. A. D, Mim J. J., Patwary Md. A. I., et al. 3D printing in construction: A review of emerging technologies, advanced materials, and future opportunities // Next Materials. – 2026. – Vol. 12. – P. 102229.

11. Wolfs R. The status quo of 3D concrete printing: are we there yet? // RILEM Tech Lett. – 2024. – Vol. 8. – P. 182-189.
12. CyBe Construction. [Электронный ресурс]. URL: <https://cybe.eu/about-us/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
13. A 3D printed pop-up store by WASP for Dior. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.3dwasp.com/concept-store-stampato-in-3d-wasp-dior/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
14. COBOD International, Дания. [Электронный ресурс]. URL: <https://cobod.com/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
15. Vertico, Нидерланды. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vertico.com/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
16. BetAbram, Словения. [Электронный ресурс]. URL: <https://betabram.com/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
17. «Аркон» строительная печать, Россия. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.3dpulse.ru/companies/arkon-construction/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
18. Лерто. О компании. [Электронный ресурс]. URL: <https://lerto.ru/company/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
19. Sika. 3D printing. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sika.com/en/sustainability/innovation/research-development/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
20. About Cemex company. Mexico. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cemex.com/en/about-us/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
21. HeidelbergCement partnership with COBOD и PERI. [Электронный ресурс]. URL: https://www.heidelbergmaterials.de/sites/default/files/assets/document/73/ad/hc_press_release_3dprint_engphotos.pdf. (Дата обращения: 10.06.2026).
22. ООО «3Д Бетон», Россия. [Электронный ресурс]. URL: <https://3dbeton.ru/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
23. Bruil. 3D beton printen. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bruil.nl/actuele-berichten/bbeeindiging-activiteiten-3d-beton-printen/>. (Дата обращения: 10.06.2026).

24. Геобетон. Смеси для строительной печати. [Электронный ресурс]. URL: <https://geobeton3d.ru/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
25. Korodur. 3D Concrete printing. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.korodur.de/produkt-kategorie/concrete-printing-3d/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
26. Black buffalo 3d corporation. [Электронный ресурс]. URL: <https://build-withstruxure.com/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
27. ChangeMaker 3D about company. [Электронный ресурс]. URL: <https://changemaker3d.co.uk/about/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
28. Смарт-Билд, Россия. [Электронный ресурс]. URL: <https://smartbuildservice.ru/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
29. БетоникАрт. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.betonikart.com/o-kompanii/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
30. WINSUN. Company profile. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.yhbm.com/En/About/#abM4/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
31. XtreeE, Франция. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.xtreee.com/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
32. 3D4Art. О компании. [Электронный ресурс]. URL: <https://3d4art.ru/%d0%be-na%d1%81/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
33. Группа компаний «АМТ» СПЕЦАВИА. [Электронный ресурс]. URL: <https://specavia.pro/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
34. Contour crafting corporation. History. [Электронный ресурс]. URL: <https://contourcrafting.com/history/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
35. ICON. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iconbuild.com/>. (Дата обращения: 10.06.2026).
36. Russel N., Lanos, C. Plastic Fluid Flow Parameters Identification Using a Simple Squeezing Test // Applied Rheology. – 2003. – № 13(3). – P. 3-5.
37. Toutou Z., Roussel N., Lanos, C. The squeezing test: A tool to identify firm cement-based material's rheological behaviour and evaluate their extrusion ability // Cement and Concrete Research. – 2005. – № 35(10). – P.1891-1899.

38. Paul S. C., Tay Y. W. D., Panda B. et al. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction // Archives of civil and mechanical engineering. – 2018. – Vol. 18. – P. 311-319.
39. Mechtcherine V. et al. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. // Cement and Concrete Research. – 2020. – Vol. 132: – P. 106037.
40. Perrot A. et al. From analytical methods to numerical simulations: A process engineering toolbox for 3D concrete printing // Cement and Concrete Composites. – 2021. – Vol. 122. P. 104164.
41. Rehman A. U., Kim J. H. 3D concrete printing: A systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics // Materials. – 2021. – Vol. 14(14). – P. 3800.
42. Roussel N., Richard B., Ivanova I., et al. Assessing the fresh properties of printable cement-based materials: High potential tests for quality control // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 158. – P. 106836.
43. Ma G., Li Z., Wang L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion-based 3D printing // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 162. – P. 613-627.
44. Adamtsevich A. O., Pustovgar A. P., Adamtsevich L. A., Markov Yu. I. 3D Concrete Printing: a Study of Printed Structures Durability // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2025. – Vol. 21, № 2. – P. 200-219.
45. Адамцевич А. О., Пустовгар А. П. Аддитивное строительное производство: исследование эффекта анизотропии прочностных характеристик бетона // Строительные материалы. – 2022. – № 9. – С. 18-24.
46. Adamtsevich A. O., Pustovgar A. P., Adamtsevich L. A. Materials for 3d concrete printing: Approach to standardization in Russia // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1043. – P. 141-148.
47. Иноземцев А. С., Королев Е. В., Зыонг Т. К., Иноземцев С. С. Использование раствора суперабсорбирующего полимера в цементных составах для 3D-

печати // В сборнике: Современные строительные материалы и технологии. Сборник научных статей. Под редакцией М.А. Дмитриевой. – Калининград, 2023. – С. 19-29.

48. Inozemtcev A., Korolev E., Duong T.Q. Lightweight concrete for 3D-printing with internal curing agent for portland cement hydration // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – № 1 (109).

49. Korolev E. V., Grishina A. N., Inozemtcev A. S., Ayzenshtadt A.M. Study of the kinetics structure formation of cement dispersed systems. Part I // Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal. – 2022. – Vol. 14, № 3. – P. 176-189.

50. Korolev E. V., Grishina A. N., Inozemtcev A. S., Ayzenshtadt A. M. Study of the kinetics structure formation of cement dispersed systems. Part II // Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal. – 2022. – Vol. 14, № 4. – P. 263-273.

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

52. Синицин Д. А., Мухаметрахимов Р. Х., Хафизов А. А., Шагигалин Г. Ю., Кузнецов Д. В., Недосеко И. В. Определение прочностных и упругодеформативных характеристик сухих смесей для строительной 3D-печати на гипсовой и цементной основах // Строительные материалы. – 2025. – № 8. – С. 9-13.

53. Шигапов Р. И., Шагигалин Г. Ю., Ключев А. В., Булатов Б. Г., Метлицкая Д. В., Недосеко И. В. Оценка долговечности композиций из сухих смесей на гипсовой и гипсоцементной основе для 3D-печати // Строительные материалы. – 2024. – № 7. – С. 26-32.

54. Kuznetsov D. V., Klyuev S. V., Ryazanov A. N., Sinitsin D. A., Pudovkin A. N., Kobeleva E. V., Nedoseko I. V. Dry mixes on gypsum and mixed bases in the construction of low-rise residential buildings using 3D printing technology // – 2023. – Vol. 6, № 6.

55. Пухаренко Ю. В., Хренов Г. М. Задачи технологической механики в развитии способов безопалубочного формования // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 6 (65). – С. 152-157.

56. Полуэктова В. А., Шаповалов Н. А., Черкашина Н. И., Кожанова Е. П., Старченко С. А. Регулирование агрегативной устойчивости бинарных полимерминеральных дисперсий // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2023. – Т. 15, № 3. – С. 258-266.
57. Poluektova V. A., Shapovalov N. A. Concrete chemicalization for digital printing: control of rheology and structure formation // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 95. – P. 59-65.
58. Полуэктова В. А. Проектирование компонентного состава “чернил” на основе цемента для строительного 3D-принтера // Перспективные материалы. – 2020. – № 2. – С. 5-13.
59. Старченко С. А., Полуэктова В. А., Шаповалов Н. А., Кожанова Е. П. Реологические свойства и структурообразование минеральной суспензии с комплексной органоминеральной добавкой // Chemical Bulletin. – 2024. – Т. 7, № 4. – С. 48-63.
60. Zhang C., Nerella V. N., Mechtcherine V., et al. Mix design concepts for 3D printable concrete: A review // Cement and Concrete Composites. – 2021. – Vol. 122. – P. 104155.
61. Nerella V. N., Krause M., Mechtcherine V., et al. Practice-oriented buildability criteria for developing 3D-printable concretes in the context of digital construction // Highlights. – 2018. – № 8. – P. 1-28.
62. Mohan M. K., Rahul A. V., Van Tittelboom K., et al. Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content // Cement and Concrete Research. – 2021. – Vol. 139. – P. 106258.
63. Mohan, M. K., Rahul, A. V., De Schutter, G., Van Tittelboom, K. Early age hydration, rheology and pumping characteristics of CSA cement-based 3D printable concrete // Construct. Build. Mater. – 2021. – Vol. 275. – P. 122136.
64. Panda B., Ruan S., Unluer C., Tan M.J. Improving the 3D printability of high volume fly ash mixtures via the use of nano attapulgite clay. Composites Part B // Engineering. – 2019. – Vol. 165. – P. 75-83.

65. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques // *Materials and Structures*. – 2016. – № 49. – P. 1213 – 1220.
66. Jacquet Y., Picandet V., Perrot A. Underwater 3D printing of concrete: Mapping mix-design drivers of hardened performances // *Construction and Building Materials*. – 2026. – Vol. 528. – P. 146539.
67. Zhang C., Hou Z., Chen C., et al. Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content // *Cement and Concrete Composites*. – 2019. – Vol. 104. – P. 103406
68. Zhang C., Jia Z., Wang X., et al. A two-phase design strategy based on the composite of mortar and coarse aggregate for 3D printable concrete with coarse aggregate // *J. Build. Eng.* – 2022. – Vol. 54. – P. 104672.
69. Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y. Leong K.F., Tan M. J., Qian S. A systematical review of 3D printable cementitious materials. // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 207. – P. 477-490.
70. Jiao D., Shi C., Yuan Q., An X., Liu Y., Li H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 83. – P. 146-159.
71. Duong T. Q., Korolev E., Inozemtcev A. Method of internal curing cement concrete used for 3D printing technology in construction // *Journal of Materials & Construction*. – 2022. – Vol. 12, № 1.
72. Сорокина, Е. А. Исследование влияния добавок ускорителей схватывания на свойства цементных композиций для 3D-печати / Е. А. Сорокина, Н. О. Копаница // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2026. – № 6(810). – С. 31-40.
73. Славчева Г.С., Артамонова О.В., Шведова М.А., Бритвина Е.А. Влияние модификаторов вязкости на структурообразование цементных систем для строительной 3D-печати // *Неорганические материалы*. – 2021. – Т. 57. – № 1. – С. 98-105.

74. Славчева Г. С., Артамонова О. В., Шведова М. А., Полосина А. А. Исследование влияния добавок-электролитов на пластичность и структурную прочность цементных смесей для строительной 3D печати // Химия, физика и механика материалов. – 2019. – № 1 (20). – С. 25-41.
75. Славчева Г. С., Артамонова О. В. Управление реологическим поведением смесей для строительной 3D-печати: экспериментальная оценка возможностей арсенала «нано» // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2019. – Т. 11 (3). – С. 325-334.
76. Slavcheva G., Artamonova O., Babenko D., Ibryaeva A. Effect of limestone filler dosage and granulometry on the 3D printable mixture rheology // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. V International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures. – 2020. – Vol. 972. – P. 012042.
77. Славчева Г. С., Артамонова О. В. Критериальная оценка реологических характеристик цементных систем для строительной 3D-печати // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – № 8 (84). – С. 97-108.
78. Славчева Г. С., Артамонова О. В. Реологическое поведение дисперсных систем для строительной 3D-печати: проблема управления и возможности арсенала «нано» // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2018. – Т. 10, № 3. – С. 107-122.
79. Шведова М. А., Артамонова О. В., Славчева Г. С. Вопросы регулирования составов цементных смесей для строительной 3D – печати // Химия, физика и механика материалов. – 2020. – № 1 (24). – С. 95-120.
80. Бритвина Е. А., Шведова М. А., Славчева Г. С., Артамонова О. В. Влияние модификаторов вязкости на кинетику набора прочности смесей для строительной 3D-печати // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2020. – № 1. – С. 46-48.
81. Wang X., Jia L., Jia Z., et al. Optimization of 3D printing concrete with coarse aggregate via proper mix design and printing process // J. Build. Eng. – 2022. – Vol. 56. – P. 104745.

82. Kruger J., Cho S., Zeranka S., Viljoen C., van Zijl G. 3D concrete printer parameter optimisation for high rate digital construction avoiding plastic collapse // *Compos. B Eng.* – 2020. – Vol. 183. – P. 107660.
83. Ji G., Ding T., Xiao J., et al. A 3D printed Ready-mixed concrete power distribution substation: materials and construction technology // *Materials.* – 2019. – Vol. 12 (9). P. 1540.
84. Ji G., Xiao J., Zhi P., Wu Y.-C., Han N. Effects of extrusion parameters on properties of 3D printing concrete with coarse aggregates // *Construct. Build. Mater.* – 2020. – Vol. 325. – P. 126740.
85. Bai G., Wang L., Ma G., Sanjayan J., Bai M. 3D printing eco-friendly concrete containing under-utilised and waste solids as aggregate // *Cement and Concrete Composites.* – 2021. – Vol. 120. – P. 104037.
86. Rahul A. V., Santhanam M., Meena H., Ghani Z. 3D printable concrete: Mixture design and test methods // *Cement and Concrete Composites.* – 2019. – Vol. 97. – P. 13-23.
87. Qi Deng, Yutong Zhuang, Wei Yang, et al. Rheological properties of mortar with recycled fine aggregate: From the perspective of particle packing // *Construction and Building Materials.* – 2025. – Vol. 465. – P. 140237.
88. Zhang Y., Zhang Y., She W., et. al. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete // *Construction and Building Materials.* – 2019. – Vol. 201. – P. 278-285.
89. Mohan M. K., Rahul A. V., Kim V. T., De Schutter G. Evaluating the Influence of Aggregate Content on Pumpability of 3D-Printable Concret // *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication.* – 2020. – Vol. 28. – P. 333-341.
90. Yu S., Xia M., Sanjaya, J., et. al. Microstructural characterization of 3D printed concrete // *J. Build. Eng.* – 2021. – Vol. 44. – P. 102948.
91. Vantghem G., De Corte W., Shakour E., Amir O. 3D printing of a posttensioned concrete girder designed by topology optimization // *Autom. ConStruct.* – 2020. – Vol. 112. – P. 103084.
92. Marchment T., Sanjayan J. Mesh reinforcing method for 3D concrete printing // *Autom. ConStruct.* – 2020. – Vol. 109 – P. 102992.

93. Van Der Putten J., De Volder M., Van den Heede P., De Schutte, G., Van Tittelboom K. 3D printing of concrete: the influence on chloride penetration // RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. – 2020. – Vol. 28. – P. 500-507.
94. Liu C., Zhang R., Liu H., et. al. Analysis of the mechanical performance and damage mechanism for 3D printed concrete based on pore structure // Construct. Build. Mater. – 2022. – Vol. 314. – P. 125572.
95. Yang Y., Wu C., Liu Z., Zhang H., 3D-printing ultra-high performance fiber-reinforced concrete under triaxial confining loads // Addit. Manuf. – 2022. – Vol. 50. – P. 102568.
96. Xiao J., Zou S., Yu Y. et al. 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing // Journal of Building Engineering. – 2020. – Vol. 32. – P. 101779.
97. Xiao J., Zou S., Ding T., Duan Z., Liu Q. Fiber-reinforced mortar with 100% recycled fine aggregates: a cleaner perspective on 3D printing // J. Clean. Prod. – 2021. – Vol. 319. – P. 128720.
98. Zou S., Xiao J., Ding T., Duan Z., Zhang Q. Printability and advantages of 3D printing mortar with 100% recycled sand // Construct. Build. Mater. – 2021. – Vol. 273. – P. 121699.
99. Tao Y., Ren Q., Lesage K., et. al. Shape stability of 3D printable concrete with river and manufactured sand characterized by squeeze flow // Cement Concr. Compos. – 2022. – Vol. 133. – P. 104674.
100. Liu J., Li S., Gunasekara C., Fox K., Tran P. 3D-printed concrete with recycled glass: effect of glass gradation on flexural strength and microstructure // Construct. Build. Mater. – 2022. – Vol. 314. – P. 125561.
101. Патент № 2852755 С2 Российская Федерация, МПК C04B 28/04, B33Y 70/00. Двухфазная смесь для получения мелкозернистого бетона в технологии строительной 3D-печати : заявл. 21.11.2023 : опубл. 15.12.2025 / Г. С. Славчева, И. О. Разов, В. А. Солонина [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тюменский индустриальный университет". – 8 с.

102. Патент № 2851946 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/04, С04В 14/06, С04В 24/00. Смесь для получения мелкозернистого бетона в технологии строительной 3D-печати : заявл. 06.08.2024 : опубл. 01.12.2025 / Г. С. Славчева, И. О. Разов, В. А. Солонина [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тюменский индустриальный университет". – 9 с.

103. Патент № 2855789 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/04, В33У 70/00, С04В 14/06. Растворная смесь для аддитивного строительного производства на композиционном вяжущем : заявл. 07.04.2025 : опубл. 02.02.2026 / Г. Ю. Шагигалин, А. Н. Рязанов, И. В. Недосеко [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский государственный нефтяной технический университет". – 10 с.

104. Патент № 2839156 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/04, С04В 14/06, С04В 22/08. Сырьевая смесь для строительной 3D-печати : заявл. 26.09.2024 : опубл. 28.04.2025 / Р. Р. Хусаинов, Г. Ю. Шагигалин ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Уфимские аддитивные строительные технологии". – 8 с.

105. Патент № 2762841 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/04, С04В 14/06, В33У 70/00. Смесь для получения декоративного композита заданной колористики в технологии строительной 3D-печати и способ ее получения : заявл. 19.11.2020 : опубл. 23.12.2021 / Г. С. Славчева, А. А. Резанов, М. А. Шведова, Е. А. Бритвина, А. А. Полосина, Д. С. Бабенко ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "3Д-СТРОЙДИЗАЙН". – 11 с.

106. Liu Z., Li M., Weng Y., Wong T. N., Tan M. J. Mixture Design Approach to optimize the rheological properties of the material used in 3D cementitious material printing // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 198. – P. 245-255

107. Lyu P., Zhou B., Wu Z., et al. Performance of 3D-printed UHPC optimized by particle packing model under standard and steam curing // Journal of Building Engineering. – 2026. – Vol. 119. – P. 115358.

108. Park C., Noh M., Park T. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures // Cement and Concrete Research. – 2005. – Vol. 35. – P. 842-849.

109. Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 145. – P. 639-647.
110. Nair S. R., Nagarajan P., Thampi S. G., Das S., Rajesh P. Rheology-driven material design of sustainable cementitious composites for extrusion-based additive manufacturing via particle packing optimization // *Environmental Progress and Sustainable Energy*. – 2026. – Art. 70617.
111. Ferrari L., Rizzieri G., Ferrara L., et al. Rheological control of cementitious composites incorporating ceramic wastes for 3D printing applications // *Cement and Concrete Composites*. – 2026. – Vol. 167. – P. 106452.
112. Renuka V., Rao S.V., Tadepalli T., et. al. Optimization and performance evaluation of multi-component binder-based mortars using particle packing techniques // *Materials*. – 2026. – Vol. 19, №5. – P. 1024.
113. Kawashima S., Chaouche M., Corr D.J., Shah S.P. Rate of thixotropic rebuilding of cement pastes modified with highly purified attapulgite clays // *Cement and Concrete Research*. – 2013. – Vol. 53: – P. 112-118.
114. Qian Y., De Schutter G. Enhancing thixotropy of fresh cement pastes with nanoclay in presence of polycarboxylate ether superplasticizer (PCE) // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 111. – P. 15-22.
115. Varela H., Barluenga G., Palomar I. Influence of nanoclays on flowability and rheology of SCC pastes // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 243. – P. 118285
116. Varela H., Barluenga G., Palomar I. Rheology evaluation of cement paste with nanoclays, nanosilica and polymeric admixtures for digital fabrication // *RILEM Bookseries*. – 2020. – Vol. 28. – P. 144-152.
117. Weng Y., Li M., Tan M. J., Qian S. Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 163. – P. 600-610.

118. Ma G., Wang L. A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. – 2018. – № 12. – P. 382-400.

119. Ребиндер П. А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика / П. А. Ребиндер – Москва: Изд. Наука, 1979. – 381 с.

120. Круглицкий Н. Н. Очерки по физико-химической механике / Н. Н. Круглицкий – Киев: Изд. Наукова думка, 1988. – 224 с.

121. Урьев Н. Б. Физико-химическая динамика структурированных нанодисперсных систем и нанодисперсных композиционных материалов. Часть 1 // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. – 2010. – Т. 46, № 1. – С. 3-23.

122. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Отчет о научно-исследовательской работе по годовому этапу проекта 121032400097-7 в рамках участия в государственном задании плана фундаментальных исследований РААСН по теме 3.1.1.2 «Строительная механика и материаловедение 3D-печатных композитов» на 2021-2023 г.г. / рук. НИР М. В. Шитикова – Воронеж, 2021. – 145 с.

123. Урьев Н. Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем / Н. Б. Урьев – М.: Химия, 1988. – 256 с.

124. Щукин Е. Д., Перцов А. В., Амелина Е. А. Коллоидная химия / Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина – М.: Высш. шк., 2007. – 444 с.

125. Патент № 2729085 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/04. Двухфазная смесь на основе цемента для композитов в технологии строительной 3D-печати: № 2019133426: заявл. 21.10.2019: опубл. 04.08.2020 / Г. С. Славчева, О. В. Артамонова, Е. А. Бритвина, Д. С. Бабенко, А. И. Ибряева; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – 8 с.

126. Патент № 2729086 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/04. Двухфазная смесь на основе цемента для композитов в технологии строительной 3D-печати: № 2019133430: заявл. 21.10.2019: опубл. 04.08.2020 / Г. С. Славчева, О. В.

Артамонова, М. А. Шведова, Е. А. Бритвина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – 8 с.

127. Патент № 2729220 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/04, В33У 70/00. Двухфазная смесь на основе цемента для композитов в технологии строительной 3D-печати: № 2019133420: заявл. 21.10.2019: опубл. 05.08.2020 / Г. С. Славчева, О. В. Артамонова, М. А. Шведова, Е. А. Бритвина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – 8 с.

128. Патент № 2729283 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/04. Двухфазная смесь на основе цемента для композитов в технологии строительной 3D-печати: № 2019133428: заявл. 21.10.2019: опубл. 05.08.2020 / Г. С. Славчева, О. В. Артамонова, Е. А. Бритвина, Д. С. Бабенко, А. И. Ибряева; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – 8 с.

129. Russel N. Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes // Cement and Concrete Research. – 2005. – Vol. 35, № 9. – P. 1656-1664.

130. Perrot A., Mélinge Y., Estellé P., et al. Vibro-extrusion: a new forming process for cement-based materials // Advances in Cement Research. – 2009. – Vol. 21, № 3. – P. 125-133.

131. Perrot A., Rangeard D., Mélinge Y., et al. Extrusion Criterion for Firm Cement and Based Materials // Applied Rheology. – 2009. – № 19. – P. 111-127.

132. Perrot A., Mélinge Y., Rangeard D., et al. Use of ram extruder as a combined rheo-tribometer to study the behaviour of high yield stress fluids at low strain rate // Rheologica Acta. – 2012. – Vol. 51. – P. 743-754.

133. Slavcheva G. S., Artamonova O. V. Rheological behavior of 3D printable cement paste: criterial evaluation // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 8 (84). – P. 97-108.

134. Славчева, Г. С., Шведова М. А., Бабенко Д. С. Анализ и критериальная оценка реологического поведения смесей для строительной 3D-печати // Строительные материалы. – 2018. – № 12. – С. 34-40.

135. Славчева Г. С., Бритвина Е. А., Ибряева А. И. Строительная 3D-печать: оперативный метод контроля реологических характеристик смесей // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2019. – № 4 (41). – С. 134-143.

136. Патент на полезную модель № 244065 U1 Российская Федерация, МПК G01N 3/28. Устройство для измерения пластичности неорганических паст : заявл. 22.12.2025 : опубл. 15.06.2026 / П. Ю. Юров, Г. С. Славчева, Д. С. Бабенко, А. В. Левченко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет". – 8 с.

137. Славчева Г. С., Бритвина Е. А., Шведова М. А., Юров П. Ю. Влияние дозировки и гранулометрии наполнителей на показатели экструдированности смесей для 3D-печати // Строительные материалы. – 2022. – № 1-2. – С. 21-29.

138. Бритвина Е. А., Славчева Г. С. Показатели технологичности цементных смесей для строительной 3D-печати: моделирование и экспериментальные исследования // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2021. – № 4 (49). – С. 56-65.

139. Бабенко Д. С. Разработка критериев и методов оценки технологических характеристик смесей для 3D-печати: 2.1.5. Строительные материалы и изделия: диссертация на соискание ученой степени к.т.н. / Бабенко Д.С. – Воронеж, 2024.

140. Юров П.Ю. Обоснование показателя и способа контроля технологичности смеси, как критерия регулирования процесса 3D- печати // МРСРЕ– 2024. – Владимир: АРКАИМ, 2024. – С. 264-272.

141. Славчева Г.С., Бритвина Е.А., Шведова М.А. Состав и свойства смесей декоративного бетона для 3D-печати // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2021. – № 4 (64). – С. 103-113.

142. Slavcheva G. S., Britvina E. A., Shvedova M. A. 3D-printable concrete with specific decorative and technological properties // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2023. – № 3 (108). – Art. 10805.

143. Slavcheva G., Britvina E., Shvedova M. Heat release during 3D-printable materials setting and hardening // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1043. – P. 37-42.

144. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Отчет о научно-исследовательской работе по годовому этапу проекта 7.10781.2018/11.12 в рамках участия в государственном задании по теме «Разработка концепции и технологической платформы создания строительных композитов для 3D-печати» на 2018 и 2019 г.г. / рук. НИР Г. С. Славчева. – Воронеж, 2020. – книга 2. – 274 с.

145. Slavcheva G., Britvina E. 3D-printable artificial marble // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – № 3 (111). – Art. 11115.

146. Шведова М. А. Цементные композиты, модифицированные полифункциональной добавкой с наночастицами SiO_2 , для строительной 3D печати : 2.1.5. Строительные материалы и изделия : диссертация на соискание ученой степени к.т.н. / Шведова М.А. – Воронеж, 2022.

147. Патент № 2767805 С1 Российская Федерация, МПК C04B 28/04, C04B 24/00, C04B 14/06, B33Y 70/00. Двухфазная смесь на основе белого цемента для получения декоративного композита в технологии строительной 3D-печати: № 2021114995: заявл. 25.05.2021: опубл. 22.03.2022 / Г. С. Славчева, Е. А. Бритвина, М. А. Шведова, А. А. Полосина, Д. С. Бабенко, А. С. Андрияшкина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – 8 с.

Приложение А

Результаты рентгенодифрактометрических исследований

Таблица А1 – Результаты рентгенодифрактометрических исследований
портландцемента СЕМ I 52,5R

Белый цемент								
Экспериментальные данные				Эталонные данные				
2 Θ	I	I _{отн}	d	2 Θ	I _{отн}	d	Модификация	№ карт.
29.31	808.6	61	3.05	29.36	60	3.04	3CaO·SiO ₂	13 – 209
29.95	241.5	18	2.98	29.94	20	2.98	3CaO·SiO ₂	13 – 209
32.07	1316.9	100	2.79	32.10	100	2.79	3CaO·SiO ₂	13 – 209
				32.10	100	2.79	2CaO·SiO ₂	31-299
				32.31	80	2.77	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	11-124
32.46	1225.7	93	2.76	32.38	50	2.76	3CaO·SiO ₂	13 – 209
				32.56	85	2.75	2CaO·SiO ₂	31-299
33.24	143.7	11	2.70	33.19	4	2.70	2CaO·SiO ₂	31-299
34.22	981.9	75	2.62	34.28	90	2.62	3CaO·SiO ₂	13 – 209
				34.09	100	2.63	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	11-124
38.61	154.5	12	2.33	38.63	10	2.33	3CaO·SiO ₂	13 – 209
				38.82	20	2.32	2CaO·SiO ₂	31-299
41.13	541.7	41	2.19	41.16	40	2.19	3CaO·SiO ₂	13 – 209
				41.02	30	2.20	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	11-124
45.62	132.4	10	1.99	45.32	9	2.00	2CaO·SiO ₂	31-299
46.75	256.6	19	1.94	46.62	20	1.95	3CaO·SiO ₂	13 – 209
				46.65	6	1.95	2CaO·SiO ₂	31-299
51.54	766	58	1.77	51.70	40	1.77	3CaO·SiO ₂	13 – 209
				51.17	12	1.79	2CaO·SiO ₂	31-299
56.26	236.7	18	1.64	56.18	20	1.64	3CaO·SiO ₂	13 – 209
56.42	110.5	8	1.63	56.57	10	1.63	3CaO·SiO ₂	13 – 209
59.70	268.7	20	1.55	59.82	20	1.55	3CaO·SiO ₂	13 – 209
				59.86	4	1.55	2CaO·SiO ₂	31-299
				58.81	40	1.57	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	11-124
62.04	153.8	12	1.50	61.39	10	1.51	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	11-124

Таблица А2 – Результаты рентгенодифрактометрических исследований цементирующего вещества бетона состава: портландцемент СЕМ I 52,5R, суперпластификатор Sika® ViscoCrete® 20HE, камедь ксантановая FUFENG® 80, жидкое стекло техническое, полипропиленовая фибра, техническая вода, заполнитель – кварцевый песок (продолжительность твердения 1 сутки)

Экспериментальные данные				Эталонные данные				
2 Θ	I	I _{отн}	d	2 Θ	I _{отн}	d	Модификация	№ карт.
20.98	876.3	11	4.23	20.90	25	4.25	SiO ₂	1-649
				21.05	40	4.22	2CaO·SiO ₂ ·H ₂ O	3-594
26.75	8046.2	100	3.33	26.61	100	3.35	SiO ₂	1-649
				29.38	100	3.04	2CaO·SiO ₂ ·H ₂ O	3-594
29.47	308.6	4	3.03	29.28	100	3.05	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				29.54	50	3.02	3CaO·SiO ₂	13 – 209
32.64	397	5	2.74	32.71	40	2.74	3CaO·SiO ₂	13 – 209
34.39	394.1	5	2.61	34.34	90	2.61	3CaO·SiO ₂	13 – 209
36.64	266.9	3	2.45	36.68	15	2.45	SiO ₂	1-649
				36.37	60	2.47	2CaO·SiO ₂ ·H ₂ O	3-594
39.57	1120.4	14	2.28	39.34	10	2.29	SiO ₂	1-649
				38.99	50	2.31	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
40.39	476.8	6	2.23	40.44	6	2.23	SiO ₂	1-649
41.29	229.7	3	2.19	41.16	40	2.19	3CaO·SiO ₂	13 – 209
50.21	984.4	12	1.82	50.12	25	1.82	SiO ₂	1-649
				49.82	70	1.83	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				50.71	60	1.80	2CaO·SiO ₂ ·H ₂ O	3-594
54.94	720.5	9	1.67	55.34	8	1.66	SiO ₂	1-649
				54.98	40	1.67	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				55.34	60	1.66	2CaO·SiO ₂ ·H ₂ O	3-594
60.01	556.7	7	1.54	60.08	20	1.54	SiO ₂	1-649
				60.51	30	1.53	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				60.07	40	1.54	2CaO·SiO ₂ ·H ₂ O	3-594
				59.82	20	1.54	3CaO·SiO ₂	13 – 209

Таблица АЗ – Результаты рентгенодифрактометрических исследований цементирующего вещества бетона состава: портландцемент СЕМ I 52,5R, суперпластификатор Sika® ViscoCrete® 20HE, камедь ксантановая FUFENG® 80, жидкое стекло техническое, полипропиленовая фибра, техническая вода, заполнитель – кварцевый песок (продолжительность твердения 28 суток)

Экспериментальные данные				Эталонные данные				
2 Θ	I	I _{отн}	d	2 Θ	I _{отн}	d	Модификация	№ карт.
26.77	4694.8	100	3.33	26.61	100	3.35	SiO ₂	1-649
				26.69	50	3.34	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
36.65	457.6	10	2.45	36.68	15	2.45	SiO ₂	1-649
				36.84	20	2.44	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
39.59	598.5	13	2.28	39.34	10	2.29	SiO ₂	1-649
				38.99	50	2.31	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
40.42	778	17	2.23	40.44	6	2.23	SiO ₂	1-649
				40.83	30	2.21	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
50.25	435.4	9	1.82	50.12	25	1.82	SiO ₂	1-649
				49.83	70	1.83	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
60.04	1328.4	28	1.54	60.08	20	1.54	SiO ₂	1-649
				60.51	30	1.53	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20

Таблица А4 – Результаты рентгенодифрактометрических исследований цементирующего вещества бетона состава: портландцемент СЕМ I 52,5R, суперпластификатор Sika®ViscoCrete®20HE, камедь ксантановая FUFENG®80, жидкое стекло техническое, полипропиленовая фибра, техническая вода, заполнитель – гранит орех (продолжительность твердения 1 сутки)

Экспериментальные данные				Эталонные данные				
2 Θ	I	I _{отн}	d	2 Θ	I _{отн}	d	Модификация	№ карт.
18.11	189.7	22	4.90	18.02	50	4.92	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				18.07	16	4.91	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
20.92	155	18	4.25	20.95	80	4.24	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
21.86	142.8	16	4.07	21.20	12	4.19	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
26.70	727.7	83	3.33	26.69	50	3.34	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				26.52	100	3.36	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				26.69	100	3.34	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
29.50	874.9	100	3.03	29.28	100	3.05	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				28.52	14	3.13	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
				29.54	50	3.02	3CaO·SiO ₂	13 – 209
32.24	221.2	25	2.78	31.96	80	2.80	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				32.10	100	2.78	3CaO·SiO ₂	13 – 209
32.63	179.8	21	2.74	32.37	50	2.76	3CaO·SiO ₂	13 – 209
34.16	168.3	19	2.62	33.82	60	2.65	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				33.70	10	2.66	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
34.37	153.3	18	2.61	34.30	90	2.61	3CaO·SiO ₂	13 – 209
39.50	157.7	18	2.28	38.99	50	2.31	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				39.34	40	2.29	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
41.28	121.9	14	2.19	41.16	40	2.19	3CaO·SiO ₂	13 – 209
43.24	81.6	9	2.09	43.07	40	2.10	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
47.08	104.9	12	1.93	46.82	20	1.94	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
48.59	99.2	11	1.87	48.41	80	1.88	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
51.86	84.6	10	1.76	51.95	40	1.76	3CaO·SiO ₂	13 – 209
56.41	89.1	10	1.63	56.83	40	1.62	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				56.30	30	1.64	3CaO·SiO ₂	13 – 209
62.20	114.8	13	1.49	61.94	30	1.49	3CaO·SiO ₂	13 – 209

Таблица А5 – Результаты рентгенодифрактометрических исследований цементирующего вещества бетона состава: портландцемент СЕМ I 52,5R, суперпластификатор Sika®ViscoCrete®20HE, камедь ксантановая FUFENG®80, жидкое стекло техническое, полипропиленовая фибра, техническая вода, заполнитель – гранит орех (продолжительность твердения 28 суток)

Экспериментальные данные				Эталонные данные				
2 Θ	I	I _{отн}	d	2 Θ	I _{отн}	d	Модификация	№ карт.
18.24	328.1	17	4.86	18.07	16	4.91	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
21.09	137.9	7	4.21	21.20	12	4.19	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
26.85	1889.6	100	3.32	26.52	100	3.36	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				26.69	50	3.34	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				26.69	100	3.34	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
27.70	1158.7	61	3.22	27.96	18	3.19	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
28.18	968.2	51	3.17	28.33	60	3.15	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				28.52	14	3.13	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
29.60	428.9	23	3.02	29.28	100	3.05	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				29.57	20	3.02	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
30.67	211	11	2.92	30.50	80	2.93	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
34.27	277.9	15	2.62	33.70	10	2.66	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
				34.77	20	2.58	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
50.28	473.5	25	1.81	49.82	70	1.83	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				50.41	60	1.81	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				50.15	16	1.86	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
67.88	596.4	32	1.38	66.82	40	1.40	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20

Таблица А6 – Результаты рентгенодифрактометрических исследований цементирующего вещества бетона состава: портландцемент СЕМ I 52,5R, суперпластификатор Sika®ViscoCrete®20HE, камедь ксантановая FUFENG®80, жидкое стекло техническое, пигмент красный «ТР-303», полипропиленовая фибра, техническая вода, заполнитель – гранит орех + сланец терракотовый (продолжительность твердения 1 сутки)

Экспериментальные данные				Эталонные данные				
2 Θ	I	I _{отн}	d	2 Θ	I _{отн}	d	Модификация	№ карт.
18.23	215.6	13	4.87	18.07	16	4.91	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
21.06	232.2	15	4.22	20.08	35	4.27	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
				20.95	80	4.24	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
26.83	1290.1	81	3.32	26.69	100	3.34	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
				26.52	100	3.36	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
27.70	510.7	32	3.22	27.97	18	3.19	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
28.12	1600.4	100	3.17	28.11	100	3.17	3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	29-330
				28.33	60	3.15	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
29.59	182.9	11	3.02	28.52	14	3.13	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
				29.30	11	3.04	3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	29-330
				29.36	50	3.02	3CaO·SiO ₂	13 – 209
32.35	246.9	15	2.77	32.10	100	2.78	3CaO·SiO ₂	13 – 209
32.71	344.2	22	2.74	32.68	14	2.74	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
				32.84	70	2.72	3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	29-330
				32.71	40	2.73	3CaO·SiO ₂	13 – 209
34.23	191.4	12	2.62	33.82	60	2.65	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				34.27	90	2.61	3CaO·SiO ₂	13 – 209
34.50	179.7	11	2.60	34.67	13	2.58	3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	29-330
42.61	192.8	12	2.12	42.04	13	2.14	3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	29-330
				42.64	40	2.12	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
50.31	291.5	18	1.81	50.15	16	1.82	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
				50.41	60	1.81	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				50.68	25	1.80	3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	29-330

Таблица А7 – Результаты рентгенодифрактометрических исследований цементирующего вещества бетона состава: портландцемент СЕМ I 52,5R, суперпластификатор Sika®ViscoCrete®20HE, камедь ксантановая FUFENG®80, жидкое стекло техническое, пигмент красный «ТР-303», полипропиленовая фибра, техническая вода, заполнитель – гранит орех + сланец терракотовый (продолжительность твердения 28 суток)

Экспериментальные данные				Эталонные данные				
2 Θ	I	I _{отн}	d	2 Θ	I _{отн}	d	Модификация	№ карт.
18.28	287.7	12	4.85	18.07	16	4.91	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
21.09	207.3	9	4.21	20.08	35	4.27	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
				21.78	20	4.08	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·	2-523
24.25	209.9	9	3.67	24.52	10	3.63	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·	2-523
26.87	1774.8	74	3.32	26.52	100	3.36	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				26.45	10	3.37	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·	2-523
				26.69	100	3.34	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
27.73	2390.2	100	3.22	27.88	100	3.2	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·	2-523
				27.96	18	3.19	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
28.11	444.4	19	3.17	28.33	60	3.15	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				28.33	10	3.15	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·	2-523
				28.52	14	3.13	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
34.30	203.2	9	2.61	35.77	50	2.51	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·	2-523
				33.69	10	2.62	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
60.10	241.8	10	1.54	60.51	10	1.53	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·	2-523
				59.99	8	1.54	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452

Таблица А8 – Результаты рентгенодифрактометрических исследований цементирующего вещества бетона состава: портландцемент CEM I 52,5R, суперпластификатор Sika®ViscoCrete®20HE, камедь ксантановая FUFENG®80, жидкое стекло техническое, пигмент зеленый Deqing tongchem CO, полипропиленовая фибра, техническая вода, заполнитель – гранит орех + змеевик (продолжительность твердения 1 сутки)

Экспериментальные данные				Эталонные данные				
2 Θ	I	I _{отн}	d	2 Θ	I _{отн}	d	Модификация	№ карт.
18.33	266.1	16	4.84	18.07	16	4.91	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
21.17	374.6	22	4.20	21.20	12	4.19	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
				20.80	35	4.27	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
26.91	1693.1	100	3.31	26.52	100	3.36	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				26.69	100	3.34	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
27.80	573.5	34	3.21	27.96	18	3.19	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
28.24	518.7	31	3.16	28.33	60	3.15	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				28.11	100	3.17	3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	29-330
				28.52	14	3.13	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
29.65	222	13	3.01	29.57	20	3.02	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				29.54	50	3.02	3CaO·SiO ₂	13 – 209
31.56	181.8	11	2.83	31.38	80	2.85	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				31.56	95	2.83	3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	29-330
32.41	261.8	15	2.76	32.10	100	2.78	3CaO·SiO ₂	13 – 209
32.83	836	49	2.73	32.84	70	2.72	3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	29-330
				32.71	40	2.73	3CaO·SiO ₂	13 – 209
34.36	189	11	2.61	34.27	90	2.61	3CaO·SiO ₂	13 – 209
				33.69	10	2.62	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
34.58	197.1	12	2.59	34.77	20	2.58	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				34.67	13	2.58	3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	29-330
51.88	156.5	9	1.76	50.15	16	1.81	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
				51.55	18	1.77	3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	29-330

Таблица А9 – Результаты рентгенодифрактометрических исследований цементирующего вещества бетона состава: портландцемент СЕМ I 52,5R, суперпластификатор Sika®ViscoCrete®20HE, камедь ксантановая FUFENG®80, жидкое стекло техническое, пигмент зеленый Deqing tongchem CO, полипропиленовая фибра, техническая вода, заполнитель – гранит орех + змеевик (продолжительность твердения 28 суток)

Экспериментальные данные				Эталонные данные				
2 Θ	I	I _{отн}	d	2 Θ	I _{отн}	d	Модификация	№ карт.
18.18	358.9	28	4.88	18.02	50	4.92	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				18.07	16	4.91	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
21.00	184.5	14	4.23	20.95	80	4.24	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				21.20	12	4.19	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
26.77	1299.4	100	3.33	26.69	100	3.34	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
				26.52	100	3.36	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				26.69	50	3.34	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
27.64	295.1	23	3.23	27.96	18	3.19	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
28.08	377.1	29	3.18	28.33	60	3.15	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
				28.52	14	3.13	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
29.55	420	32	3.02	29.28	100	3.05	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20
				29.54	50	3.02	3CaO·SiO ₂	13 – 209
32.73	226.9	17	2.74	32.10	100	2.78	3CaO·SiO ₂	13 – 209
34.22	298.9	23	2.62	33.82	60	2.65	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
34.46	306.8	24	2.60	33.69	10	2.62	CaO·2SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·4H ₂ O	20-452
				34.27	90	2.61	3CaO·SiO ₂	13 – 209
42.58	146.5	11	2.12	42.64	40	2.12	2CaO·3SiO ₂ ·H ₂ O	3-414
52.82	147.4	11	1.73	53.25	30	1.72	(CaO) _x ·SiO ₂ ·zH ₂ O	6-20

Протоколы независимых испытаний декоративных мелкозернистых бетонов для 3D-печати

Б1 Протокол испытания бетона, изготовленного из смеси 3D.A.ТІЭ.В60

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ)

Московский пр-т, д. 14, Воронеж, 394026 Тел./факс (473)246-42-65;

E-mail: mail@vorstu.ru, <http://www.vorstu.ru>

ОГРН 1033600070448, ИНН/КПП 3662020886/366201001

Испытательная лаборатория Центр коллективного пользования имени проф. Ю.М. Борисова

Свидетельство об Аттестации №979.08/33 от 08.04.2019 г.

Свидетельство об Аккредитации №ИЛ/ЛРИ – 01473 от 22.11.2019 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Директор АРСК ФГБОУ ВО «ВГТУ»


В.Я. Мищенко
на основании доверенности №06-юр-08/1806 от 02.10.2020 г.
МП «8» октября 2020 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ №7-3467ГС1/57495/20-ЦКП от 08.10.2020г.

Основание для проведения испытаний:	Договор №3467ГС1/57495 от 03.03.2020 (код 0057495), заявка №С1-69891, конкурс Старт-19-1 (4 очередь). Разработать, изготовить и провести испытание опытных образцов архитектурных смесей для строительной 3D-печати малых форм уличной архитектуры задаваемой колористики и физико-климатической стойкости для системы унифицированных многофункциональных арт-модулей.
Наименование продукции:	Проба смеси для 3D-печати с текстурой искусственного камня 3D.A.ТІЭ.В60
Сведения об испытываемых образцах:	Образцы – цилиндры свежесформованной смеси радиусом 25 мм в количестве 6 шт. для оценки: - предела текучести (2 шт.) - структурной прочности (2 шт.) - пластической прочности (2 шт.); - относительной деформативности смеси (2 шт.); Образцы – цилиндры свежесформованной смеси радиусом 50 мм для испытаний на: - время схватывания (2 шт.); Образцы кубы 3D - печатного композита с длиной ребра 50 мм для испытаний на: - морозостойкость (6 шт.); - прочность при сжатии (6 шт.); - прочность при раскалывании (6 шт.); - плотность (6 шт.); - водопоглощение (5 шт.); Образцы пластины размером 10х4х160 мм для определения: - усадки (6 шт.).
Методика испытаний:	ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка». ГОСТ 12730.3-78 «Бетоны. Метод определения водопоглощения».

	ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Метод определения морозостойкости». ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» ГОСТ 24544-81 Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести
Результаты испытаний:	Приложение 1
Применяемое при испытаниях оборудование и средства измерений:	Универсальный испытательный комплекс Гидравлическая система INSTRON Satec 1500HDX. Универсальная напольная электромеханическая испытательная система 5900, модель 5982 фирмы INSTRON. Пенетрометр Georocket грунтовой универсальный S068 со стандартным плунжером d = 6,4 мм. Камера нормального твердения и влажного хранения образцов КНТ-48. Климатическая камера Vötsch Industrietechnik GmbH VT 7011. Печь муфельная ПМ-14М1П-1200 с вытяжкой. Морозильная камера. Растворосмеситель (Е095). Пластометр ручной (С190). Микрометр. Диапазон измерений 150-175 мм; точность измерений 0,01. Эксикаторы объемом 6/10/18 мл. Прибор Вика.
Протокол составлен:	На 3 (трех) листах включая Приложение 1

Заключение: Разработанные смеси и композиты для 3D-печати соответствуют требованиям действующих стандартов.

Начальник

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова _____ Хорохордин А.М.



Приложение 1 к Протоколу испытаний №7-3467ГС1/57495 /20-ЦКП от 08.10.2020г.

Проба смеси для 3D-печати с текстурой искусственного камня (эталон)
3D.A.TIЭ.B60

Наименование параметра	Значение
Предел текучести при сдвливании, кПа	2,38
Структурная прочность вязко-пластичной смеси, кПа	0,74
Пластическая прочность вязко-пластичной смеси, кПа	45,78
Относительная деформация слоя вязко-пластичной смеси до начала разрушения, мм/мм	0,06
Конец схватывания, мин	75
Прочность на сжатие композиционного материала в возрасте 24 час, МПа	47,72
Прочность на сжатие композиционного материала в возрасте 28 суток, МПа	67,8
Прочность на растяжение при раскалывании композиционного материала в возрасте 28 суток, МПа	3,4
Плотность композиционного материала, кг/м ³	2260
Водопоглощение композиционного материала, %	8,5
Морозостойкость, цикл	200
Усадка (в эксплуатационном диапазоне обезвоживания), мм/м	≤ 1,6

Ответственные исполнители:

Инженер ВГТУ МВШ Шведова М.А.

Инженер

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова А Андреищев Д.А.

Зав. лабораторией

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова Е Черникова Е.А.

Начальник

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова Х Хорохордин А.М.

Б2 Протокол испытания бетона, изготовленного из смеси 3D.A.III.B55

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ)

Московский пр-т, д. 14, Воронеж, 394026 Тел./факс (473)246-42-65;

E-mail: mail@vorstu.ru, <http://www.vorstu.ru>

ОГРН 1033600070448, ИНН/КПП 3662020886/366201001

Испытательная лаборатория Центр коллективного пользования имени проф. Ю.М. Борисова

Свидетельство об Аттестации №979.08/33 от 08.04.2019 г.

Свидетельство об Аккредитации №ИЛ/ЛРИ – 01473 от 22.11.2019 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Директор АРСК ФГБОУ ВО «ВГТУ»



В.Я. Мищенко

на основании доверенности №06-юр-08/1806 от 02.10.2020 г.

МП

«8» октября 2020 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ №8-3467ГС1/57495/20-ЦКП от 08.10.2020г.

Основание для проведения испытаний:	Договор №3467ГС1/57495 от 03.03.2020 (код 0057495), заявка №С1-69891, конкурс Старт-19-1 (4 очередь). Разработать, изготовить и провести испытание опытных образцов архитектурных смесей для строительной 3D-печати малых форм уличной архитектуры задаваемой колористики и физико-климатической стойкости для системы унифицированных многофункциональных арт-модулей.
Наименование продукции:	Проба смеси для 3D-печати с текстурой искусственного камня 3D.A.III.B55
Сведения об испытываемых образцах:	Образцы – цилиндры свежееотформованной смеси радиусом 25 мм в количестве 6 шт. для оценки: - предела текучести (2 шт.) - структурной прочности (2 шт.) - пластической прочности (2 шт.); - относительной деформативности смеси (2 шт.); Образцы – цилиндры свежееотформованной смеси радиусом 50 мм для испытаний на: - время схватывания (2 шт.); Образцы кубы 3D - печатного композита с длиной ребра 50 мм для испытаний на: - морозостойкость (6 шт.); - прочность при сжатии (6 шт.); - прочность при раскалывании (6 шт.); - плотность (6 шт.); - водопоглощение (5 шт.); Образцы пластины размером 10х4х160 мм для определения: - усадки (6 шт.).
Методика испытаний:	ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка». ГОСТ 12730.3-78 «Бетоны. Метод определения водопоглощения».

	ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Метод определения морозостойкости». ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» ГОСТ 24544-81 Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести
Результаты испытаний:	Приложение 1
Применяемое при испытаниях оборудование и средства измерений:	Универсальный испытательный комплекс Гидравлическая система INSTRON Satec 1500HDX. Универсальная напольная электромеханическая испытательная система 5900, модель 5982 фирмы INSTRON. Пенетрометр Георocket грунтовой универсальный S068 со стандартным плунжером d = 6,4 мм. Камера нормального твердения и влажного хранения образцов КНТ-48. Климатическая камера Vötsch Industrietechnik GmbH VT 7011. Печь муфельная ПМ-14М1П-1200 с вытяжкой. Морозильная камера. Растворосмеситель (Е095). Пластометр ручной (С190). Микрометр. Диапазон измерений 150-175 мм; точность измерений 0,01. Эксикаторы объемом 6/10/18 мл. Прибор Вика.
Протокол составлен:	На 3 (трех) листах включая Приложение 1

Заключение: Разработанные смеси и композиты для 3D-печати соответствуют требованиям действующих стандартов.

Начальник

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова  Хорохордин А.М.

Приложение 1 к Протоколу испытаний №8-3467ГС1/57495 /20-ЦКП от 08.10.2020г.

Проба смеси для 3D-печати с текстурой искусственного камня
3D.A.ТП.B55

Наименование параметра	Значение
Предел текучести при сдавливании, кПа	1,23
Структурная прочность вязко-пластичной смеси, кПа	1,42
Пластическая прочность вязко-пластичной смеси, кПа	42,25
Относительная деформация слоя вязко-пластичной смеси до начала разрушения, мм/мм	0,08
Начало схватывания, мин	105
Прочность на сжатие композиционного материала в возрасте 24 час, МПа	44,7
Прочность на сжатие композиционного материала в возрасте 28 суток, МПа	61
Прочность на растяжение при раскалывании композиционного материала в возрасте 28 суток, МПа	3,07
Плотность композиционного материала, кг/м ³	2206
Водопоглощение композиционного материала, %	9,1
Морозостойкость, цикл	200
Усадка (в эксплуатационном диапазоне обезвоживания), мм/м	≤ 1,4

Ответственные исполнители:

Инженер ВГТУ  Шведова М.А.

Инженер

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова  Андреищев Д.А.
Зав. лабораторией

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова  Черникова Е.А.

Начальник

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова  Хорохордин А.М.

Б3 Протокол испытания бетона, изготовленного из смеси 3D.A.TIV.B60

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

(ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ)

Московский пр-т, д. 14, Воронеж, 394026 Тел./факс (473)246-42-65;

E-mail: mail@vorstu.ru, <http://www.vorstu.ru>

ОГРН 1033600070448, ИНН/КПП 3662020886/366201001

Испытательная лаборатория Центр коллективного пользования имени проф. Ю.М. Борисова

Свидетельство об Аттестации №979.08/33 от 08.04.2019 г.

Свидетельство об Аккредитации №ИЛ/ЛРИ – 01473 от 22.11.2019 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Директор АРСК ФГБОУ ВО «ВГТУ»



В.Я. Мищенко

на основании доверенности №06-юр-08/1806 от 02.10.2020 г.

МП

«9» октября 2020 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ №10-3467ГС1/57495 /20-ЦКП от 09.10.2020г.

Основание для проведения испытаний:	Договор №3467ГС1/57495 от 03.03.2020 (код 0057495), заявка №С1-69891, конкурс Старт-19-1 (4 очередь). Разработать, изготовить и провести испытание опытных образцов архитектурных смесей для строительной 3D-печати малых форм уличной архитектуры задаваемой колористики и физико-климатической стойкости для системы унифицированных многофункциональных арт-модулей.
Наименование продукции:	Проба смеси для 3D-печати с текстурой искусственного камня 3D.A.TIV.B60
Сведения об испытываемых образцах:	Образцы – цилиндры свежесформованной смеси радиусом 25 мм в количестве 6 шт. для оценки: - предела текучести (2 шт.) - структурной прочности (2 шт.) - пластической прочности (2 шт.); - относительной деформативности смеси (2 шт.); Образцы – цилиндры свежесформованной смеси радиусом 50 мм для испытаний на: - время схватывания (2 шт.); Образцы кубы 3D - печатного композита с длиной ребра 50 мм для испытаний на: - морозостойкость (6 шт.); - прочность при сжатии (6 шт.); - прочность при раскалывании (6 шт.); - плотность (6 шт.); - водопоглощение (5 шт.); Образцы пластины размером 10x4x160 мм для определения: - усадки (6 шт.).
Методика испытаний:	ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка». ГОСТ 12730.3-78 «Бетоны. Метод определения водопоглощения».

	ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Метод определения морозостойкости». ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» ГОСТ 24544-81 Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести
Результаты испытаний:	Приложение 1
Применяемое при испытаниях оборудование и средства измерений:	Универсальный испытательный комплекс Гидравлическая система INSTRON Satec 1500HDX. Универсальная напольная электромеханическая испытательная система 5900, модель 5982 фирмы INSTRON. Пенетрометр Georocket грунтовой универсальный S068 со стандартным плунжером d = 6,4 мм. Камера нормального твердения и влажного хранения образцов КНТ-48. Климатическая камера Vötsch Industrietechnik GmbH VT 7011. Печь муфельная ПМ-14М1П-1200 с вытяжкой. Морозильная камера. Растворосмеситель (E095). Пластометр ручной (C190). Микрометр. Диапазон измерений 150-175 мм; точность измерений 0,01. Эксикаторы объемом 6/10/18 мл. Прибор Вика.
Протокол составлен:	На 3 (трех) листах включая Приложение 1

Заключение: Разработанные смеси и композиты для 3D-печати соответствуют требованиям действующих стандартов.

Начальник

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова  Хорохордин А.М.

Приложение 1 к Протоколу испытаний №10-3467ГС1/57495 /20-ЦКП от 09.10.2020г.

Проба смеси для 3D-печати с текстурой искусственного камня
3D.A.TIV.B60

Наименование параметра	Значение
Предел текучести при сдавливании, кПа	3,49
Структурная прочность вязко-пластичной смеси, кПа	1,95
Пластическая прочность вязко-пластичной смеси, кПа	40,71
Относительная деформация слоя вязко-пластичной смеси до начала разрушения, мм/мм	0,05
Конец схватывания, мин	75
Прочность на сжатие композиционного материала в возрасте 24 час, МПа	41,60
Прочность на сжатие композиционного материала в возрасте 28 суток, МПа	63,7
Прочность на растяжение при раскалывании композиционного материала в возрасте 28 суток, МПа	4,3
Плотность композиционного материала, кг/м ³	2231
Водопоглощение композиционного материала, %	9,4
Морозостойкость, цикл	200
Усадка (в эксплуатационном диапазоне обезвоживания), мм/м	≤ 1,4

Ответственные исполнители:

Инженер ВГТУ  Шведова М.А.

Инженер

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова  Андреищев Д.А.

Зав. лабораторией

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова  Черникова Е.А.

Начальник

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова  Хорохордин А.М.

Б4 Протокол испытания бетона, изготовленного из смеси 3D.A.TV.B45

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

(ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ)

Московский пр-т, д. 14, Воронеж, 394026 Тел./факс (473)246-42-65;

E-mail: mail@vorstu.ru, <http://www.vorstu.ru>

ОГРН 1033600070448, ИНН/КПП 3662020886/366201001

Испытательная лаборатория Центр коллективного пользования имени проф. Ю.М. Борисова

Свидетельство об Аттестации №979.08/33 от 08.04.2019 г.

Свидетельство об Аккредитации №ИЛ/ЛРИ – 01473 от 22.11.2019 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Директор АРСК ФГБОУ ВО «ВГТУ»

В.Я. Мищенко

на основании доверенности №06-юр-08/1806 от 02.10.2020 г.

МП

«9» октября 2020 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ №11-3467С1/57495/20-ЦКП от 9.10.2020г.

Основание для проведения испытаний:	Договор №3467С1/57495 от 03.03.2020 (код 0057495), заявка №С1-69891, конкурс Старт-19-1 (4 очередь). Разработать, изготовить и провести испытание опытных образцов архитектурных смесей для строительной 3D-печати малых форм уличной архитектуры задаваемой колористики и физико-климатической стойкости для системы унифицированных многофункциональных арт-модулей.
Наименование продукции:	Проба смеси для 3D-печати с текстурой искусственного камня 3D.A.TV.B45
Сведения об испытываемых образцах:	Образцы – цилиндры свежееотформованной смеси радиусом 25 мм в количестве 6 шт. для оценки: - предела текучести (2 шт.) - структурной прочности (2 шт.) - пластической прочности (2 шт.); - относительной деформативности смеси (2 шт.); Образцы – цилиндры свежееотформованной смеси радиусом 50 мм для испытаний на: - время схватывания (2 шт.); Образцы кубы 3D - печатного композита с длиной ребра 50 мм для испытаний на: - морозостойкость (6 шт.); - прочность при сжатии (6 шт.); - прочность при раскалывании (6 шт.); - плотность (6 шт.); - водопоглощение (5 шт.); Образцы пластины размером 10х4х160 мм для определения: - усадки (6 шт.).
Методика испытаний:	ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка». ГОСТ 12730.3-78 «Бетоны. Метод определения водопоглощения».

	ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Метод определения морозостойкости». ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» ГОСТ 24544-81 Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести
Результаты испытаний:	Приложение 1
Применяемое при испытаниях оборудование и средства измерений:	Универсальный испытательный комплекс Гидравлическая система INSTRON Sattec 1500HDX. Универсальная напольная электромеханическая испытательная система 5900, модель 5982 фирмы INSTRON. Пенетрометр Georocket грунтовой универсальный S068 со стандартным плунжером d = 6,4 мм. Камера нормального твердения и влажного хранения образцов КНТ-48. Климатическая камера Vötsch Industrietechnik GmbH VT 7011. Печь муфельная ПМ-14М1П-1200 с вытяжкой. Морозильная камера. Растворосмеситель (E095). Пластометр ручной (C190). Микрометр. Диапазон измерений 150-175 мм; точность измерений 0,01. Эксикаторы объемом 6/10/18 мл. Прибор Вика.
Протокол составлен:	На 3 (трех) листах включая Приложение 1

Заключение: Разработанные смеси и композиты для 3D-печати соответствуют требованиям действующих стандартов.

Начальник

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова  Хорохордин А.М.

Приложение 1 к Протоколу испытаний №11-3467ГС1/57495 /20-ЦКП от 9.10.2020г.

Проба смеси для 3D-печати с текстурой искусственного камня
3D.A.TV.B45

Наименование параметра	Значение
Предел текучести при сдвливании, кПа	1,80
Структурная прочность вязко-пластичной смеси, кПа	3,88
Пластическая прочность вязко-пластичной смеси, кПа	34,72
Относительная деформация слоя вязко-пластичной смеси до начала разрушения, мм/мм	0,04
Конец схватывания, мин	120
Прочность на сжатие композиционного материала в возрасте 24 час, МПа	36,5
Прочность на сжатие композиционного материала в возрасте 28 суток, МПа	54,5
Прочность на растяжение при раскалывании композиционного материала в возрасте 28 суток, МПа	3,1
Плотность композиционного материала, кг/м ³	2139
Водопоглощение композиционного материала, %	9,10
Морозостойкость, цикл	200
Усадка (в эксплуатационном диапазоне обезвоживания), мм/м	≤ 1,3

Ответственные исполнители:

Инженер ВГТУ  Шведова М.А.

Инженер

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова  Андреищев Д.А.

Зав. лабораторией

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова  Черникова Е.А.

Начальник

Центра коллективного пользования им. проф. Ю.М. Борисова  Хорохордин А.М.

Патент на изобретение №2767805 «Двухфазная смесь на основе белого цемента для получения декоративного композита в технологии строительной 3D-печати»



Технологический регламент производства сухих смесей строительных для строительной 3D-печати

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям

В.И.ИУ

/ Башенников А. В. /

«03» апреля 2026 г.



СОГЛАСОВАНО

Директор

ООО «СТРОЙСАНТЕХМОНТАЖ»

/ Дорофеев Ю. Б. /

«03» апреля 2026 г.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ ПРОИЗВОДСТВА СУХИХ СМЕСЕЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ НА ЦЕМЕНТНОМ ВЯЖУЩЕМ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ

Исполнитель:

Бритвина Е. А.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ	3
2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОИЗВОДИМОЙ ПРОДУКЦИИ	4
3. ХАРАКТЕРИСТИКА СЫРЬЯ И МАТЕРИАЛОВ.....	5
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС.....	6
5. КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА	8
6. НОРМЫ РАСХОДА.....	9
7. ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ.....	11
8. ПРАВИЛА ПРИЕМКИ	12
9. БЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	13

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- 1.1 Настоящий технологический регламент устанавливает порядок ведения технологического процесса производства сухих строительных смесей (ССС) на цементном вяжущем с использованием заполнителей крупностью до 5 мм, требования к сырью, готовой продукции, а также правила безопасности и контроля качества.
- 1.2 Настоящий регламент распространяется на производство смесей, применяемых в технологии строительной 3D-печати, в которых используются природные мелкие заполнители с размерами зёрен от 0,16 мм до 5 мм.
- 1.3 Смеси для строительной 3D-печати должны соответствовать требованиям настоящего регламента.
- 1.4 Рекомендации учитывают применение стандартного оборудования производства кладочных, штукатурных и шпатлевочных смесей.
- 1.5 Рекомендации касаются вопросов:
- 1) Требований к исходным компонентам смесей;
 - 2) Требований предъявляемых к компонентному составу смесей;
 - 3) Основных показателей качества изготавливаемых смесей.
- 1.6 Рекомендации обеспечивают получение мелкозернистых цементных смесей для технологии строительной 3D-печати, применяемых при производстве декоративных элементов и малых архитектурных форм.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОИЗВОДИМОЙ ПРОДУКЦИИ

2.1 Номенклатура.

Условное обозначение смесей должно состоять из наименования соответствующих классификационных признаков и обозначения основных технических показателей смесей.

2.2 Выделяемые виды смесей:

Класс А – архитектурная

Подкласс О – объемноокрашенная

Подкласс Т – с текстурой (отличается видами текстур, получаемых за счет заполнителей)

Группы:

I. Искусственный белый кварц

II. Искусственный белый гранит

III. Искусственный туф (красный мрамор)

IV. Искусственный зеленый гранит

Класс К – конструкционная

Подкласс З – с заполнителями

Подкласс Н – с наполнителями

В – класс по прочности на сжатие определенный согласно ГОСТ 10180-2012
Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

Пример маркировки: 3D смесь архитектурная, текстурированная с классом бетона В 40 будет маркирована как - 3D.A.TI.B40.

2.3 Основные показатели качества.

2.3.1 Основные показатели качества смесей, готовых к отгрузке:

- наибольшая крупность зерен заполнителя;
- содержание зерен наибольшей крупности;
- насыпная плотность сухой смеси.

2.3.2 Основные показатели качества смесей, готовых к применению:

- пластичность;

- формоустойчивость;
- начало схватывания смеси;
- относительная деформация слоя смеси.
- прочность на сжатие (24 часа).

2.4 Требования безопасности.

Готовая продукция не должна выделять вредные вещества в количествах, превышающих ПДК, установленные органами здравоохранения.

3. ХАРАКТЕРИСТИКА СЫРЬЯ И МАТЕРИАЛОВ

3.1 Основные компоненты.

3.1.1 Портландцемент по ГОСТ 10178 Портландцемент и шлакопортландцемент.

Технические условия; общестроительные цементы по ГОСТ 31108 Цементы общестроительные. Технические условия; белый цемент по ГОСТ 965 Портландцементы белые. Технические условия.

3.1.2 Заполнители с размерами частиц от 0,16 мм до 5 мм, песок для строительных работ по ГОСТ 8736 Песок для строительных работ. Технические условия, декоративные заполнители (гранит орех, сланец терракотовый и др.) по ГОСТ 22856 Щебень и песок декоративные из природного камня. Технические условия.

3.1.3 Минеральные наполнители, фракция до 0,1 мм.

3.1.4 Химические добавки, пластификаторы и модификаторы вязкости, применяемые в соответствии с их паспортами безопасности.

3.1.5 Добавки пигменты на основе железных окислов.

3.2 Входной контроль сырья.

3.2.1 Для основного вяжущего компонента (цемента) производят: проверку активности, нормальной густоты, сроков схватывания.

3.2.2 Для заполнителей и наполнителей: зерновой состав методом ситового анализа, влажность, содержание глинистых частиц.

3.2.3 Для химических добавок, пластификаторов и модификаторов вязкости производят проверку на соответствие сопроводительной документации.

3.3 Лабораторный контроль качества сырья производится по методикам, утвержденным действующими нормативными документами.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

4.1 Принципиальная технологическая схема представлена на рисунке 1.

4.2. Подготовка заполнителей.

4.2.1. Сушка заполнителя.

Влажный заполнитель подается ленточным питателем в сушильный барабан. Процесс осуществляется при температуре, исключающей деструкцию компонентов.

Режим сушки:

Температура теплоносителя: 300-600°C;

Производительность: до 15 т/ч .

4.2.2. Рассев песка

Высушенный песок подается на вибрационное сито для разделения по фракциям.

Контрольные параметры отсева:

- Размер ячеек для фракций: 5 мм; 2,5 мм, 1,25 мм, 0,63 мм, 0,315 мм, 0,16 мм.

- Контроль полноты просева.

4.3 Дозирование компонентов.

Дозирование осуществляется весовым способом с автоматическим управлением:

- Основные компоненты (цемент, заполнители, наполнители) взвешиваются в главном весовом бункере.

- Добавки дозируются в системе микродозирования (погрешность дозирования: не более $\pm 1\%$).

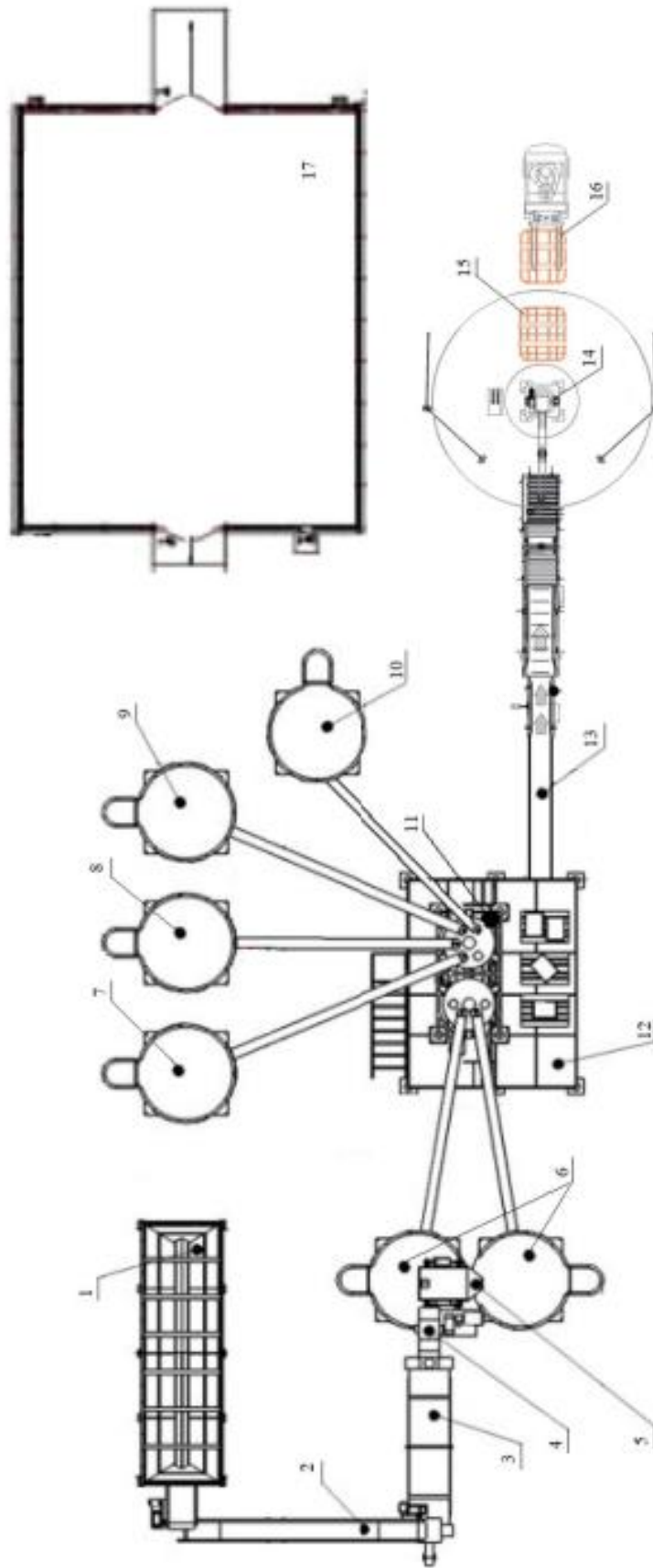


Рисунок 1. – технологическая линия производства сухих строительных смесей для строительной 3D-печати
 Обозначено: 1 - приемный бункер с транспортером для заполнителей, 2 – транспортер, 3 – сушильный барабан, 4 – элеватор, 5 – виброгрохот, 6 – силосы песка, 7 – силосы цемента, 8 – силос наполнителей, 9 – силос пластифицирующих добавок, 10 – силос модифицирующих добавок, 11 – смеситель, 12 – платформа фасовки, 13 – транспортер, 14 – робот укладчик, 15 – упаковщик паллет, 16 – готовая продукция, 17 – склад готовой продукции.

4.4 Смешивание.

Процесс смешения осуществляется в смесителе периодического действия.

Рабочий объем смесителя должен быть не менее 500 литров, частота вращения вала – 32 об/мин, производительность 8 т/ч.

Технологический режим смешения:

- последовательная загрузка компонентов смеси: заполнитель, наполнитель, цемент, добавки;
- время перемешивания: 3-5 минут (до достижения однородности);
- контроль однородности осуществляется визуально по отобраным пробам.

4.5 Выгрузка, транспортировка, фасовка и упаковка смеси.

Смесь после перемешивания выгружается через пневматический затвор непосредственно на фасовку в заранее заготовленные 50-и килограммовые бумажные мешки, с нанесенным знаком – честный знак.

Робот-укладчик осуществляет укладку отдельных пакетов на паллет, находящийся на специальном упаковщике. Укомплектованная паллета обматывается термоусадочной пленкой. И вилочным погрузчиком упакованный паллет перевозится на склад готовой продукции до отгрузки покупателю.

5. КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

5.1 Пооперационный контроль.

Операция	Контролируемый параметр	Периодичность
Приемка сырья	Качество цемента, песка, добавок	Каждая партия
Сушка песка	Влажность песка на выходе	Каждые 2 часа
Рассев песка	Зерновой состав, фракция до 5 мм	Каждые 4 часа
Дозирование	Точность весов	Ежемесячно
Смешение	Время цикла, однородность	Каждая партия
Готовая продукция	Полный анализ по ТУ	Каждая партия

5.2 Лабораторный контроль качества:

- определение влажности ССС;
- определение наибольшей крупности зерен заполнителя;

- определение насыпной плотности ССС;
- определение пластичности смеси (пенетрометрическим методом);
- определение формоустойчивости (диаметр расплыва смесей по результатам встряхивающего теста);
- определение начала схватывания смеси;
- определение относительной деформации слоя под действием собственного веса и при нагружении;
- определение прочности при сжатии в возрасте 24 часа.

5.3 Нормируемые показатели для сухих строительных смесей в технологии строительной 3D-печати:

Наименование параметра	Значение
Влажность, %	не более 7 %
Наибольшая крупность зерен заполнителя	остаток на сите 5 не более 0,5 %
Пластичность смеси, кПа	1 – 3
Формоустойчивость смеси, мм	150 – 200
Начало схватывания, мин	не ранее 30
Конец схватывания, мин	не позднее 120
Относительная деформация слоя, мм/мм	не более 0,1
Прочность на сжатие композиционного материала в возрасте 24 час, МПа	не менее 30

5.4 Документирование.

Результаты контроля фиксируются в журналах. Параметры технологического процесса выводятся на экран оператора и архивируются для последующего анализа.

6. НОРМЫ РАСХОДА

6.1 Содержание зерен наибольшей крупности в смесях определяют по остатку на сите, соответствующем наибольшей крупности зерен заполнителя. Остаток на сите, соответствующем размеру зерен наибольшей крупности заполнителя, в смесях должен быть не более 0,5 %.

6.2 Расход пластифицирующей добавки не должен превышать 1,2 % от массы цемента.

6.3 Расход модифицирующих добавок зависит от их вида, но не более 3 % от массы цемента.

6.4 Содержание вредных примесей в заполнителях не должно превышать значений, установленных в ГОСТ 26633, ГОСТ 8267 или нормативных и технических документах на смеси конкретных видов, в которых предусмотрены требования к заполнителям.

6.5 Химические добавки по эффективности действия должны соответствовать критериям эффективности по ГОСТ 24211.

6.6 Расход для получения мелкозернистых смесей строительных для аддитивных технологий:

Наименование материала	Расход материала, кг/л				
	3D.K.3.B60	3D.A.TI.B60	3D.A.TII.B55	3D.A.TIII.B60	3D.A.TIV.B45
Фаза I					
Портландцемент CEM I 42,5R	921	—	—	—	—
Портландцемент CEM I 52,5R	—	888	860	858	861
Песок кварцевый	1152	1110	—	—	—
Гранит орех	—	—	1076	858	861
Сланец терракотовый	—	—	—	215	—
Серпентинит	—	—	—	—	215
Модифицирующая добавка (ВМК-45)	18	—	—	—	—
Стабилизирующая добавка (Камедь FUFENG®80)	—	1,8	1,7	1,7	1,7
Модифицирующая добавка натриевая	—	1,8	1,7	1,7	1,7
Пигмент красный	—	—	—	1,7	—
Пигмент зеленый	—	—	—	—	1,7

Примечание: нормы корректируются в зависимости от рецептуры конкретной смеси, а также фракционного состава применяемого заполнителя.

Корректировку и подбор компонентного состава смеси можно выполнить с использованием формулы 1:

$$m_{\text{цем.матр}}/m_{\text{заполнителя}} = \frac{\rho_{\text{цем.матр}}}{\rho_{\text{зап.ист}}} \left(\left(\frac{1}{\varphi} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i \cdot (d_i + \delta)^3}{d_i^3} \right) - 1 \right) \quad (1)$$

где $\rho_{\text{цем.матр}}$ – плотность применяемой цементной матрицы, в зависимости от ее компонентного состава, $\rho_{\text{зап.ист}}$ – истинная плотность заполнителя, φ – плотность сложения частиц заполнителя, a_i – доля остатка на ситах по массе, d_i – средний диаметр i -ой фракции, δ – расстояние между частицами заполнителя, определяемое из условия $0,15 \cdot d_{\text{ср}} \leq \delta \leq 0,21 \cdot d_{\text{ср}}$, $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр частиц заполнителя.

7. ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ

7.1 Транспортирование

7.1.1 Упакованные сухие смеси перевозят транспортными пакетами автомобильным, железнодорожным и другими видами транспорта в соответствии с правилами перевозки и крепления грузов, действующими на транспорте конкретного вида, и инструкцией изготовителя.

7.1.2 Применяемые способы транспортирования смесей должны исключать возможность попадания в них атмосферных осадков, а также обеспечивать сохранность упаковки от механического повреждения и нарушения целостности.

7.2 Хранение

7.2.1 Смеси следует хранить в упакованном виде, избегая увлажнения и обеспечивая сохранность упаковки, в крытых сухих складских помещениях с относительной влажностью воздуха не более 60%.

7.2.2 Гарантийный срок хранения упакованных смесей при хранении в соответствии с 5.2.1 - 6 месяцев со дня изготовления. По истечении срока хранения смесь должна быть проверена на соответствие требованиям настоящего регламента и/или нормативных или технических документов на смеси конкретных видов. В случае соответствия требованиям настоящего регламента и/или нормативного или технического документа на смесь конкретного вида смесь допускается использовать по назначению.

8. ПРАВИЛА ПРИЕМКИ

- 8.1 Смеси должны быть приняты техническим контролем предприятия-изготовителя. Смеси отпускают и принимают по массе.
- 8.2 Смеси принимают партиями. За партию смеси принимают количество смеси одного вида и состава, приготовленной из одних материалов по одной технологии. Объем партии смеси устанавливают по согласованию с потребителем, но не менее одной сменной и не более одной суточной выработки смесителя.
- 8.3 Качество смесей подтверждают приемочным контролем, включающим приемо-сдаточные и периодические испытания. Для проведения испытаний от каждой партии смеси отбирают методом случайного отбора не менее чем из пяти упаковочных единиц.
- 8.4 При приемо-сдаточных испытаниях каждой партии смеси определяют: влажность, наибольшую крупность зерен, пластичность, формоустойчивость, начало и конец схватывания смеси, относительная деформация слоя, прочность на сжатие в возрасте 24 час. Партию смеси принимают, если результаты приемо-сдаточных испытаний по всем показателям соответствуют требованиям настоящего регламента. Партию смеси бракуют, если смесь хотя бы по одному показателю не соответствует требованиям настоящего регламента.

8.5 Потребитель имеет право проводить контрольную проверку качества смесей в соответствии с требованиями и методами, установленными в настоящем регламенте.

8.6 Каждая партия поставляемой смеси должна сопровождаться документом о качестве, в котором указывают:

- наименование предприятия-изготовителя;
- наименование и условное обозначение смеси; - номер партии;
- номер и дату выдачи документа о качестве;
- объем партии, кг (т);
- значения основных показателей качества смесей, определяющих область их применения;
- обозначение нормативного или технического документа на смесь конкретного вида.

При экспортно-импортных операциях содержание документа о качестве уточняется в договоре на поставку смеси.

9. БЕЗОПАСНОСТЬ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

9.1 Смесей являются негорючими, пожаро-взрывобезопасными материалами.

9.2 Санитарно- и радиационно-гигиеническую безопасность смесей устанавливают на основании санитарно-эпидемиологического заключения уполномоченных органов государственного санитарного надзора и оценивают по безопасности смесей или их составляющих. Безопасность минеральных составляющих смесей (цемента, заполнителей, наполнителей, пигментов) оценивают по содержанию радиоактивных веществ, безопасность химических добавок в составе смесей - по санитарно-гигиеническим характеристикам добавок.

9.3 Смесей не должны выделять во внешнюю среду вредные химические вещества в количествах, превышающих предельно допустимые концентрации (ПДК), утвержденные органами здравоохранения.

- 9.4 Запрещается сбрасывать смеси, а также отходы от промывки оборудования в водоемы санитарно-бытового использования и канализацию.
- 9.5 К производству допускаются кадры с соответствующей квалификацией.
- 9.6 Перед доступом к производству обязательны к прохождению вводный и первичный инструктажи по технике безопасности на предприятии, в утвержденной на предприятии форме. Периодический инструктаж проводится в соответствии с установленным на предприятии графиком.

Акт внедрения в производство в ООО «СТРОЙСАНТЕХМОНТАЖ»

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «СТРОЙСАНТЕХМОНТАЖ»



/Дорофеев Ю.Б./

10.03.2026 г.

АКТ**внедрения результатов научных исследований
в производственный процесс**

Заказчик ООО «СТРОЙСАНТЕХМОНТАЖ»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационного исследования ассистента кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов им. проф. Ю. М. Борисова Бритвиной Екатерины Алексеевны «Проектирование составов мелкозернистых бетонов для строительных аддитивных технологий» по специальности 2.1.5. «Строительные материалы и изделия» выполненного в ФГБОУ ВО «ВГТУ», использованы при производстве опытной партии сухой смеси для строительной 3D-печати.

1. Вид и форма результатов, принятых к практической реализации.

Промышленная апробация возможности производства сухих смесей для строительной 3D-печати по рецептурам, разработанным в диссертационной работе Бритвиной Е.А., показала возможность производства данных смесей на оборудовании предприятия, которое является типовым для заводов сухих строительных смесей. Для производства использовались составы с заполнителями с размером зерна менее 5 мм.

2. *Характеристика масштаба внедрения:* объем партии смеси 40 т.
3. *Новизна результатов диссертационного исследования:* качественно новые.
4. *Эффективность практической реализации:*

Для производства сухих смесей для строительной 3D-печати по рецептурам, разработанным в диссертационной работе Бритвиной Е.А., не требуется переналадки оборудования и, соответственно, дополнительных затрат на организацию их серийного производства. Эффективность такого производства для ООО «СТРОЙСАНТЕХМОНТАЖ» определяется возможностью выпуска качественно новой продукции, не имеющей аналогов на рынке.

Главный технолог



Е.Д. Григорьева

Приложение Е

Акт внедрения результатов в производство в ООО «Бетоник АРТ»



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «БетоникАРТ»
Беданов А.А.
от «22» 04 2026

АКТ

О внедрении в производство результатов диссертационного исследования ассистента кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов им. проф. Ю. М. Борисова Бритвиной Екатерины Алексеевны по научной специальности 2.1.5 «Строительные материалы и изделия», выполненного в ФГБОУ ВО «ВГТУ».

Мы, нижеподписавшаяся комиссия, в составе:

- Генеральный директор Беданов А.А.
- Управляющий производством Катралеев А.С.

Составили настоящий акт о том, что в течении 2026 года в производственном цехе ООО «БетоникАРТ», расположенного по адресу: Белгородская область, Белгородский р-н, с. Стрелецкое, ул. Зареченская, 856, стр. 7, реализована строительная 3D-печать опытной партии малых архитектурных форм (вазоны, декоративные фигуры), используемых при благоустройстве городской среды. Для печати использовались мелкозернистые бетоны с размером зерна заполнителя менее 5 мм.

Комиссия установила следующее:

Апробированные мелкозернистые бетоны, разработанные в диссертационном исследовании Бритвиной Е.А., соответствуют заявленным разработчиком характеристикам, что позволяет их применять в технологии строительной 3D-печати и изготавливать изделия, обладающие необходимыми физико-механическими и физико-климатическими показателями.

Генеральный директор _____

Беданов А.А.

Управляющий производством _____

Катралеев А.С.



Юридический адрес:
ООО «ОЛАН», 308510, Белгородская область, Белгородский район, пгт Разумное, ул.Чехова, дом 1, офис 3а
тел.: +7 903 642-20-20



Адрес производства:
308511, Белгородская область, Белгородский район, с. Стрелецкое, ул.Зареченская, 856
e-mail: olanzabor@yandex.ru
www.betonikART.ru

Приложение Ж

Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

ФГБОУ ВО ВГТУ

/Яременко С. А./

2026 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научных исследований в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационных исследований ассистента кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов им. проф. Ю. М. Борисова Бритвиной Екатерины Алексеевны *«Проектирование составов мелкозернистых бетонов для строительных аддитивных технологий»* внедрены в учебный процесс университета.

Заказчик: кафедра строительных конструкций, оснований и фундаментов им. проф. Ю. М. Борисова ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

1. Вид внедряемых результатов.

Разделы лекционных курсов и практических занятий по дисциплине «Эффективные композиционные конструкции» для магистров, обучающихся по направлению 08.04.01 «Строительство», программы «Эффективные строительные конструкции и изделия, основания и фундаменты, инженерно-геологические изыскания».

2. Форма внедрения.

В лекционном курсе и блоке практических занятий «Эффективные композиционные конструкции» разработаны разделы, посвященные особенностям технологических свойств, предъявляемых к материалам, используемым в

технологии строительной экструзионной безопалубочной печати, и требованиям, предъявляемым к конструкциям, полученным путем послойной печати. А также рассматриваются вопросы, связанные с особенностями управления структурой и проектирования состава строительных мелкозернистых смесей для 3D-печати.

3. Эффективность практической реализации.

Внедрение результатов диссертационного исследования Бритвиной Е.А. в учебный процесс позволяет обучающимся ознакомиться с информацией, посвященной материалам, применяемым в технологии экструзионной безопалубочной печати, моделированию процессов экструзии и послойного формования изделий и конструкций, а также обоснованию особых технологических свойств, позволяющих обеспечить процесс строительной 3D-печати; производить проектирование составов с учетом обеспечения показателей пластичности и формоустойчивости мелкозернистых цементных смесей, применяемых в технологии аддитивного строительства, и достижения требуемых физико-механических характеристик и показателей физико-климатической стойкости.

Повышен содержательный уровень лекционных курсов и практических занятий при подготовке магистров, обучающихся по направлению 08.04.01 «Строительство», программы «Эффективные строительные конструкции и изделия, основания и фундаменты, инженерно-геологические изыскания».

Заведующий кафедрой
СКОиФ им. проф. Ю. М. Борисова



Панфилов Д. В.

Разработчик рабочей программы и оценочных
материалов по дисциплине «Эффективные
композиционные конструкции», к.т.н., доцент
каф. СКОиФ им. проф. Ю. М. Борисова



Левченко А. В.