На правах рукописи



БРИТВИНА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСЕЕВНА

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель:	**Славчева Галина Станиславовна** доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	**Недосеко Игорь Вадимович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра «Строительные конструкции», профессор
	Полуэктова Валентина Анатольевна, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», кафедра теоретической и прикладной химии, профессор
Ведущая организация:	**ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»**

Защита диссертации состоится 24 декабря 2026 года в 14^{00} часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, ауд. 3220.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте https://cchgeu.ru.

Автореферат разослан «30» октября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Макеев Алексей Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. 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, экструдируемость, 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., Пухаренко Ю. В., Полуэктовой В. А., Недосеко И. В. В результате экспериментально получены и успешно апробированы десятки составов 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 экструдируемость и формоустойчивость. К реологическим характеристикам при действии сдавливающих 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 матриц к среднему диаметру частиц заполнителя, 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, характеризуемые 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 вязкопластичных 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 сдавливающей 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. МГУ им. Н. П. Огарёва, г. Саранск), Всероссийской научно-практической конференции «Военно-инженерное дело на Дальнем Востоке России» (14-21 января 2020 г. ДВФУ, г. Владивосток), Национальной молодежной научно-практической

конференции "Молодые ученые - развитию национальной технологической инициативы" ПОИСК 2020 (22-24 апреля 2020 г. ИВГПУ, г. Иваново), Всероссийской научной конференции, посвящённой 90-летию выдающегося учёного-материаловеда, академика РААСН Ю. М. Баженова (01-02 октября 2020 г. МГСУ, г. Москва), EECE-2020 International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (19-20 ноября 2020 г. СПбПУ Петра Великого, г. Санкт-Петербург), IV Международной научно-практической конференции «Современные строительные материалы и технологии» (25-28 мая 2021 г. БФУ имени Иммануила Канта, г. Калининград), Международной научно-практической конференции «Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование» (30-31 марта 2023 г. ИВГПУ, г. Иваново), VII Международной научно-практической конференции «Современные проблемы материаловедения» (26 февраля 2026 г. ЛГТУ, г. Липецк).

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен анализ опыта применения аддитивных технологий (3D-печати) в строительстве, действующих методик проектирования составов различных видов бетонов. Выявлено, что классические методы проектирования составов тяжелых и мелкозернистых бетонов неприменимы из-за особых технологических свойств смесей для 3D-печати, при этом отсутствуют общедоступная номенклатура, универсальные специальные методы проектирования составов последних.

Для решения проблемы сформулирована научная концепция исследования, опирающаяся на модель структуры смеси как гетерогенной дисперсной системы, рассматриваемой на двух масштабных уровнях (таблица 1). На мезоуровне структура представляется в виде двухкомпонентной системы «цементная матрица + включения (зерна мелкого заполнителя)», в которой цементная матрица принимается как условно однородная вязко-пластичная среда. На микроуровне структура цементной матрицы рассматривается как классическая гетерогенная дисперсная система «дисперсная фаза (частицы цемента и наполнителей) + дисперсионная среда (водно-ионный раствор)». В качестве критериального параметра структуры, который определяет ее устойчивость на различных этапах технологического процесса печати, принята толщина прослойки цементной матрицы ($\delta_{цм}$) между частицами заполнителя, величина которой должна обеспечивать:

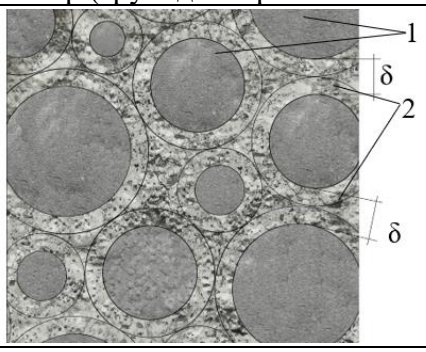
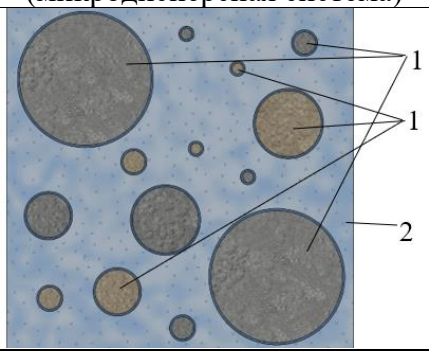
- течение смеси без нарушения сплошности структуры в динамических условиях перекачивания и экструзии;
- агрегативную устойчивость (формоустойчивость) смеси в статических условиях послойной укладки слоев.

Согласно принятой модели предложены структурные параметры и рецептурно-технологические факторы регулирования технологических характеристик цементных смесей, послужившие основой постановки исследований.

Во второй главе охарактеризованы сырьевые материалы и состав исследуемых систем, представлено факторное пространство каждого этапа экспериментов, охарактеризованы методы экспериментальных исследований.

С целью получения исходных данных и разработки методики проектирования составов бетонов проводили исследования реологического поведения и технологических характеристик модельных цементных смесей (таблица 2).

Таблица 1 – Структурные и рецептурно-технологические факторы управления реологическими свойствами цементных систем

Масштабный уровень	МЕЗОУРОВЕНЬ	МИКРОУРОВЕНЬ
Анализируемая система	Мелкозернистый цементный раствор (грубодисперсная система)	Микрозернистое цементное тесто (микродисперсная система)
Модель структуры смеси (1 – компоненты включений; 2 – матрица)		
Компоненты включений	Зерна заполнителя 0,1 – 5 мм	Зерна цемента и микронаполнителя 0,001 – 0,1 мм
Вещественный состав матрицы	Микрозернистая цементная паста	Водно-ионный раствор
Реологический тип	Неньютоновская жидкость	Ньютоновская жидкость
Структурные параметры	- расстояние между частицами - толщина прослойки вязко-пластичной цементной матрицы ($\delta_{цм}$) - объемное соотношение заполнителя и цементной матрицы ($V_з/V_{цм}$) - морфология, средний размер ($d_з$) и распределение по размерам частиц заполнителя - плотность упаковки частиц заполнителя	- 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)
Рецептурно-технологические факторы	- массовые отношения заполнителя и цемента - фракционный состав (гранулометрия) заполнителя	- водоцементное отношение (водотвердое отношение) - гранулометрический состав частиц цемента и микронаполнителя - химико-минералогический состав цемента - виды и дозировки добавок электролитов - вид и концентрация модификаторов вязкости и ПАВ

На первом этапе эксперимента исследовали влияние заполнителей различного гранулометрического состава и концентрации на реологическое поведение модельных мелкозернистых смесей. На втором этапе эксперимента оценивали влияние состава цементной матрицы на реологическое поведение мелкозернистых смесей. Гранулометрия и концентрация заполнителей принималась постоянной на основании результатов первого этапа эксперимента. Составы цементной матрицы отличались видом вяжущего и модифицирующих добавок.

Таблица 2 – Характеристика составов исследуемых модельных систем

Обозначение системы	Соотношение по массе Ц : П (К)	Дозировка добавок, % от массы цемента				В/Ц
		СП	МКЛ	ТКПФ	КМ	
1 этап эксперимента						
Ц – П – СП – В/Ц	1 : 1; 1 : 1,25; 1 : 1,5; 1 : 1,75; 1 : 2	0,8	–	–	–	0,28-0,31
Ц – К – СП – В/Ц	1 : 1; 1 : 1,25; 1 : 1,5; 1 : 1,75	0,8	–	–	–	0,28-0,32
2 этап эксперимента						
Ц – П – СП – МКЛ	1 : 1,25	1	2	-	-	0,28
Ц – П – СП – ТКПФ – КМ	1 : 1,25	1,2	-	0,2	0,2	0,29
Цб – П – СП – МКЛ	1 : 1,25	1	2	-	-	0,31
Цб – П – СП – ТКПФ – КМ	1 : 1,25	1,2	-	0,2	0,2	0,32

Условные обозначения: Ц – портландцемент CEM I 42,5R, Цб – портландцемент CEM I 52,5R, П – кварцевый песок, К – карбонатный песок СП – суперпластификатор Sika® ViscoCrete®20HE, МКЛ – метакаолин «ВМК-45», ТКПФ – тетракалийпирофосфат (тех.), КМ – камедь ксантановая

Оценка реологического поведения смесей производилась специальными методами сдавливающей реометрии, признанными эффективными для задач строительной 3D-печати.

Испытывали образцы-цилиндры вязко-пластичной смеси размером $R = h_0 = 25$ мм. Оценка пластического поведения смеси (способности к экструзии) выполнялась при сдавливании образцов с постоянной скоростью деформирования 5 мм/с. Полученные результаты интерпретировались в виде кривых «нагрузка F^* – относительное изменение высоты образца h_i/R», в точке перегиба которых определялась величина оценки предела пластичности $K_i(I)$, как показатель экструдируемости.

Оценка агрегативной устойчивости смеси (формоустойчивости) выполнялась при сдавливании образцов с постоянной скоростью нагружения 0,5 Н/с. Полученные результаты интерпретировались в виде кривых «относительные деформации – напряжение», «относительные деформации – время». Способность слоя смеси воспринимать нагрузку без деформирования оценивалась по значению структурной прочности (σ_0), соответствующей началу деформирования образца, способность воспринимать нагрузку без трещинообразования – по значению пластической прочности ($\sigma_{пл}$) в точке начала трещинообразования и разрушения, в которой также фиксировались значения относительных пластических деформаций ($\Delta_{пл}$).

На третьем этапе исследований осуществлена экспериментальная апробация методики и алгоритма проектирования составов бетонов для 3D-печати. Запроектированы составы архитектурных бетонов с использованием 4 видов декоративных заполнителей различного фракционного состава (таблица 3). Для всех запроектированных составов выполняли исследование реологического поведения смесей методами сдавливающей реометрии, для оценки работоспособности определяли кинетику изменения пластической прочности смесей после изготовления и в процессе схватывания.

Таблица 3 – Характеристика применяемых заполнителей

Вид заполнителя	Имитируемая текстура	Гранулометрический состав по остаткам на ситах, %					Плотность упаковки частиц φ, %	$d_{ср}$, мм	Истинная плотность, кг/м^3	Насыпная плотность, кг/м^3
		0,16 - 0,315	0,315 - 0,63	0,63 - 1,25	1,25 - 2,5	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

Технологичность смесей оценивали по показателю пластической прочности при помощи двух приборов – конического пластометра и стандартного грунтового пенетрометра Geopocket S068.

После экспериментальной корректировки запроектированных составов по технологической пригодности к печати, нормированными методами произведена комплексная оценка физико-механических свойств, физико-климатической стойкости, структуры (методами РФА и СЭМ) бетонов на их основе.

Опытно-промышленная апробация результатов исследований проводились на опытно-промышленном участке Центра аддитивных технологий ВГТУ, оснащенном промышленным 3D-принтером «KEYCODE», модель «КРАФТЕР-У». Для апробации были приняты три запроектированных состава декоративных смесей, объектами печати являлись малые архитектурные формы. Качество смесей оценивали по пластической прочности перед началом и в конце печати; печатные объекты – по качеству печатного слоя, устойчивости и геометрическому соответствию напечатанных объектов CAD-модели.

В третьей главе изложены результаты экспериментальных исследований цементных смесей; положения разработанной методики проектирования составов мелкозернистых бетонов для 3D-печати.

На основании изучения пластического поведения установлено, что мелкозернистые смеси на полифракционном заполнителе с соотношением $m_{зап}/m_{ц} < 1,25$ характеризуются кривыми деформирования $F^*=f(h_i/R)$ без выраженных переходов между участками кривой (рисунок 1 а). Величина нагрузки в зоне пластического течения составляет ~1-3 кПа, поэтому системы данного типа обладают способностью к вязкопластическому течению без разрушения структуры в достаточно широком диапазоне внешней нагрузки для эффективной экструзии. При $m_{зап}/m_{ц} \geq 1,5$ характер кривых $F^*=f(h_i/R)$ резко изменяется, появляется точка перегиба (резкого падения напряжений при росте деформаций), что свидетельствует о преодолении порога устойчивости и начале разрушения структуры. Системы с таким типом реологического поведения не пригодны к формированию бездефектного экструзионного слоя из-за повышенной жесткости. Все смеси на монофракционном заполнителе квалифицированы как жесткие (рисунок 1 б) во всем исследованном диапазоне

варьирования содержания заполнителя. Это обусловлено наличием выраженных перегибов при переходе из зоны устойчивости к зоне вязкопластического течения на кривой $F^*=f(h_i/R)$, а также высокими значениями нагрузки F^* = 4-8 кПа, необходимой для деформирования при формировании экструзионного слоя смеси.

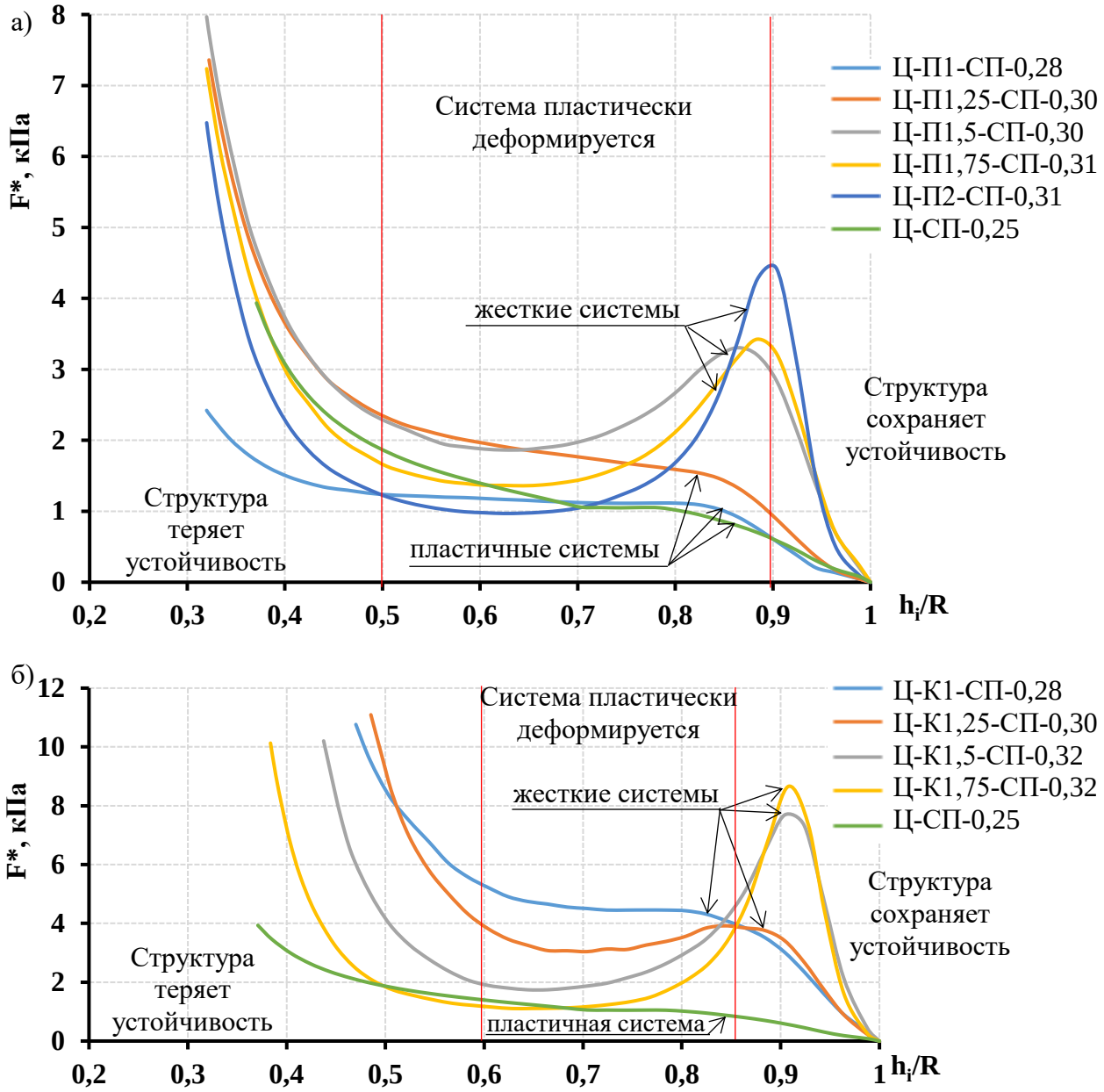


Рисунок 1 – Экспериментальные кривые $F^*=f(h_i/R)$ реологического поведения при сдавливании с постоянной скоростью деформирования для модельных мелкозернистых смесей с различными видами заполнителей
а) на полифракционном заполнителе; б) на монофракционном заполнителе

Изучение реологического поведения при сдавливании с постоянной скоростью нагружения (рисунок 2) позволило квалифицировать смеси по трем типам – повышенной жесткости (тип I), устойчивые (тип II), неустойчивые (тип III).

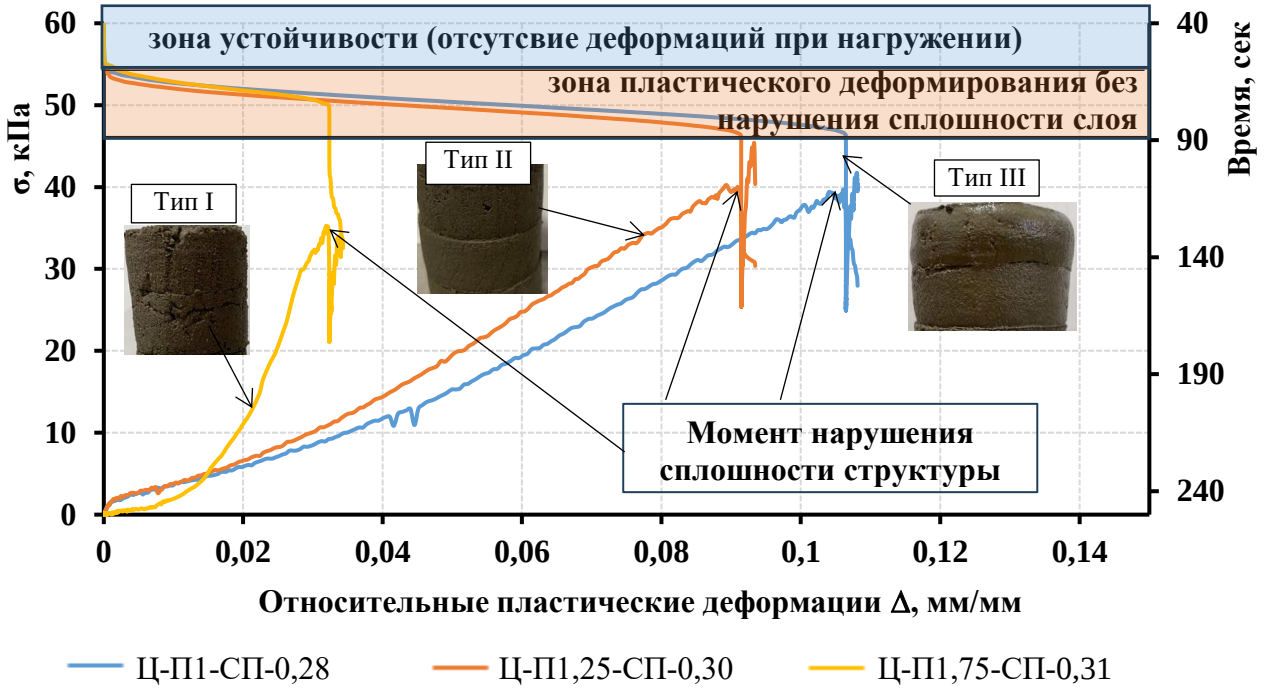


Рисунок 2 – Типичные экспериментальные кривые реологического поведения при сдавливании с постоянной скоростью нагружения мелкозернистых смесей

Для жестких смесей ($m_{зап}/m_ц > 1,45$) характерна малая зона пластического деформирования до момента потери сплошности структуры слоя. Для неустойчивых систем повышенной текучести ($m_{зап}/m_ц \leq 1$) характерны низкие значения структурной прочности, то есть неспособность воспринимать нагрузку без деформирования. Для устойчивых смесей ($m_{зап}/m_ц$ ~ 1-1,25) характерны одновременно высокие показатели структурной прочности, длинная зона пластического деформирования при $\Delta \leq 0,1$ мм/мм.

По результатам комплексной оценки реологического поведения смесей определены исходные граничные требования к реологическим характеристикам смесей, которые обеспечивают экструдируемость и формоустойчивость. К ним отнесены: оценка предела пластичности $K_i(I)$ = 1,0-2,5 кПа, структурная прочность σ_0 = 1-3 кПа, относительные пластические деформации слоя $\Delta_{пл} \leq 0,1$ мм/мм. Для обеспечения данных характеристик установлено, что соотношение массы заполнителя к массе цемента должно находиться в диапазоне $m_{зап}/m_ц$ = 1,1-1,45 (рисунок 3). При этом заполнитель должен быть полифракционного состава при наличии не менее трех стандартных фракций, содержание каждой фракции должно быть не более 75 % от общей массы заполнителя.

На основании полученных экспериментальных данных и расчетов структурных параметров подтверждена выдвинутая научная концепция, что реологические характеристики смеси зависят от толщины прослойки цементной матрицы между частицами заполнителя. При этом внесено уточнение, что значения данного критериального параметра зависят не только от объемного соотношения цементной матрицы и заполнителя в структуре смеси, но и от распределения размеров частиц заполнителя.

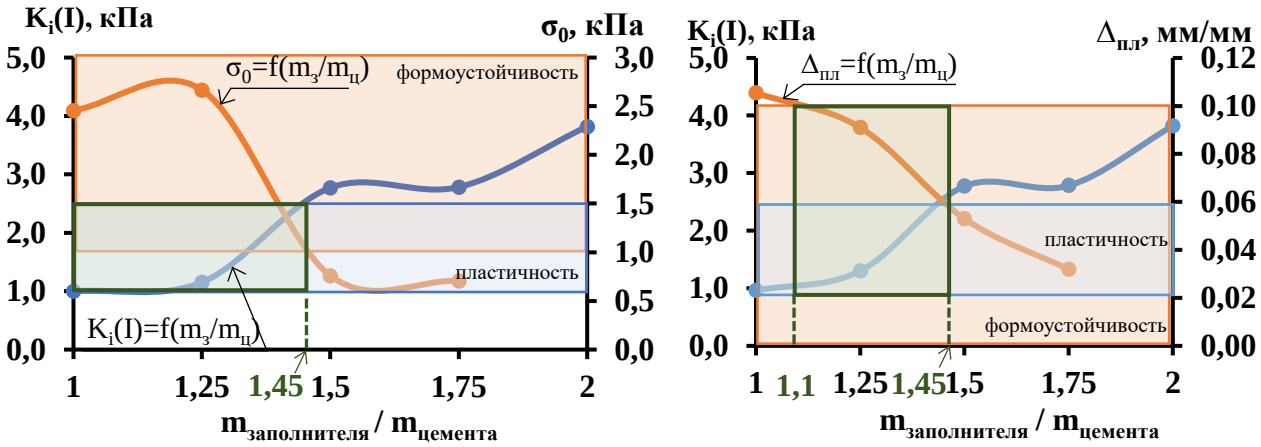


Рисунок 3 – Взаимосвязь параметров состава с комплексом реологических характеристик мелкозернистых смесей

На основании этого при проектировании составов мелкозернистого бетона предложено опираться на значения $\delta_{цм}/d_{ср}$ – отношения толщины прослойки между частицами ($\delta_{цм}$) к среднему диаметру частиц ($d_{ср}$). На основании анализа взаимосвязи данного параметра с показателем пластичности $K_i(I)$ (рисунок 4), а также комплексом показателей формоустойчивости для проектирования составов смесей предложено использовать ограничения $\delta_{цм}/d_{ср}$ = 0,15-0,21. Это соответствует диапазону отношений объема цементной матрицы к объему частиц заполнителя $V_{цм}/V_{зап}$ = 1,2-1,5; массы заполнителя к массе цемента $m_{зап}/m_{ц}$ = 1,1-1,4.

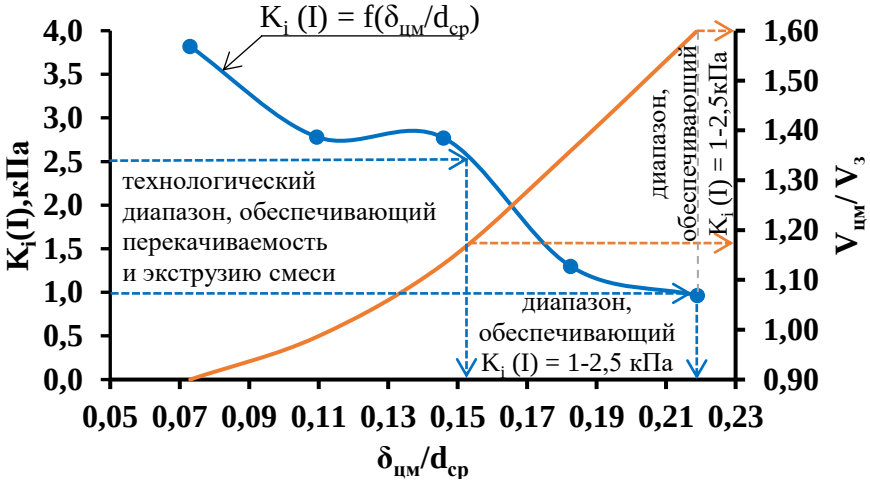


Рисунок 4 – Взаимосвязь реологических характеристик с параметрами структуры мелкозернистых смесей

На втором этапе эксперимента 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 (рисунок 5). При этом, для достижения требуемого диапазона пластичности мелкозернистых смесей ($K_i(I)$ = 1,0-2,5 кПа) значения $K_i(I)$ цементной матрицы должны быть на 30-40 % ниже конкретного задаваемого значения для проектируемого состава смеси.

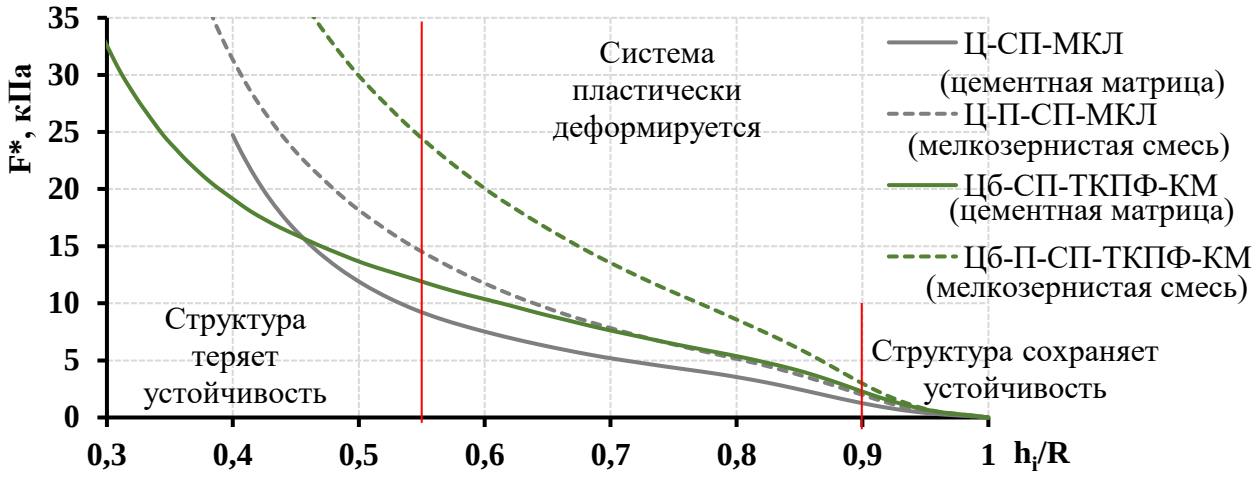


Рисунок 5 – Типичные примеры реологического поведения цементных смесей при сдавливании с постоянной скоростью деформирования

По результатам испытаний установлено, что прочность мелкозернистого бетона ниже на 15-20 % прочности цементного камня, аналогичного по виду и дозировкам химических добавок. Это закономерно обусловлено высокой раздвижкой зерен заполнителя в бетоне для обеспечения задаваемых технологических свойств смесей.

На основании полученных экспериментальных взаимосвязей «характеристики сырья – состав, структура – технологические свойства смеси, прочность бетона» разработаны исходные положения для методики проектирования составов мелкозернистых бетонов для 3D-печати, состоящие в следующем:

- объём бетона представляется в виде двухкомпонентной системы «цементная матрица + заполнитель», соотношение которых должно обеспечивать наличие прослойки матрицы между зернами заполнителя;

- в качестве критериального параметра структуры принимается отношение толщины прослойки цементной матрицы к среднему диаметру частиц заполнителя $\delta_{цм}/d_{ср}$ = 0,15-0,21;

- гранулометрия заполнителей учитывается через допущение, что все частицы заполнителя имеют форму шара диаметром, равным среднему значению между размером ячеек стандартного набора сит, при этом 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);

- упаковка заполнителей заданной гранулометрии учитывается через допущение, что система сложения частиц заполнителя сохраняется, изменение положения частиц изменяется через увеличение расстояния между ними на толщину прослойки цементной матрицы;

- подбор вида цементной матрицы осуществляется по требуемым технологическим характеристикам и задаваемым прочностным показателям.

В задании на проектирование должны учитываться следующие характеристики цементной матрицы:

1) оценка предела пластичности цементной матрицы должна находиться в диапазоне 0,7-1,7 кПа. В качестве комплексной технологический характеристики

предлагается использовать пластическую прочность ($P_{пл}$) на основании установленной ее прямой сильной корреляции с комплексом реологических характеристик. Задается характеристика пластичности мелкозернистого бетона из диапазона варьирования $P_{пл}$ = 0,2-1,7 кгс/см^2 (по данным пенетрометра), $P_{пл}$ =1,0-2,5 кПа (по данным пластометра).

2) прочность цементного камня должна на 25 % выше задаваемой прочности мелкозернистого бетона.

Разработанная методика и алгоритм включает следующие этапы (рисунок 6):

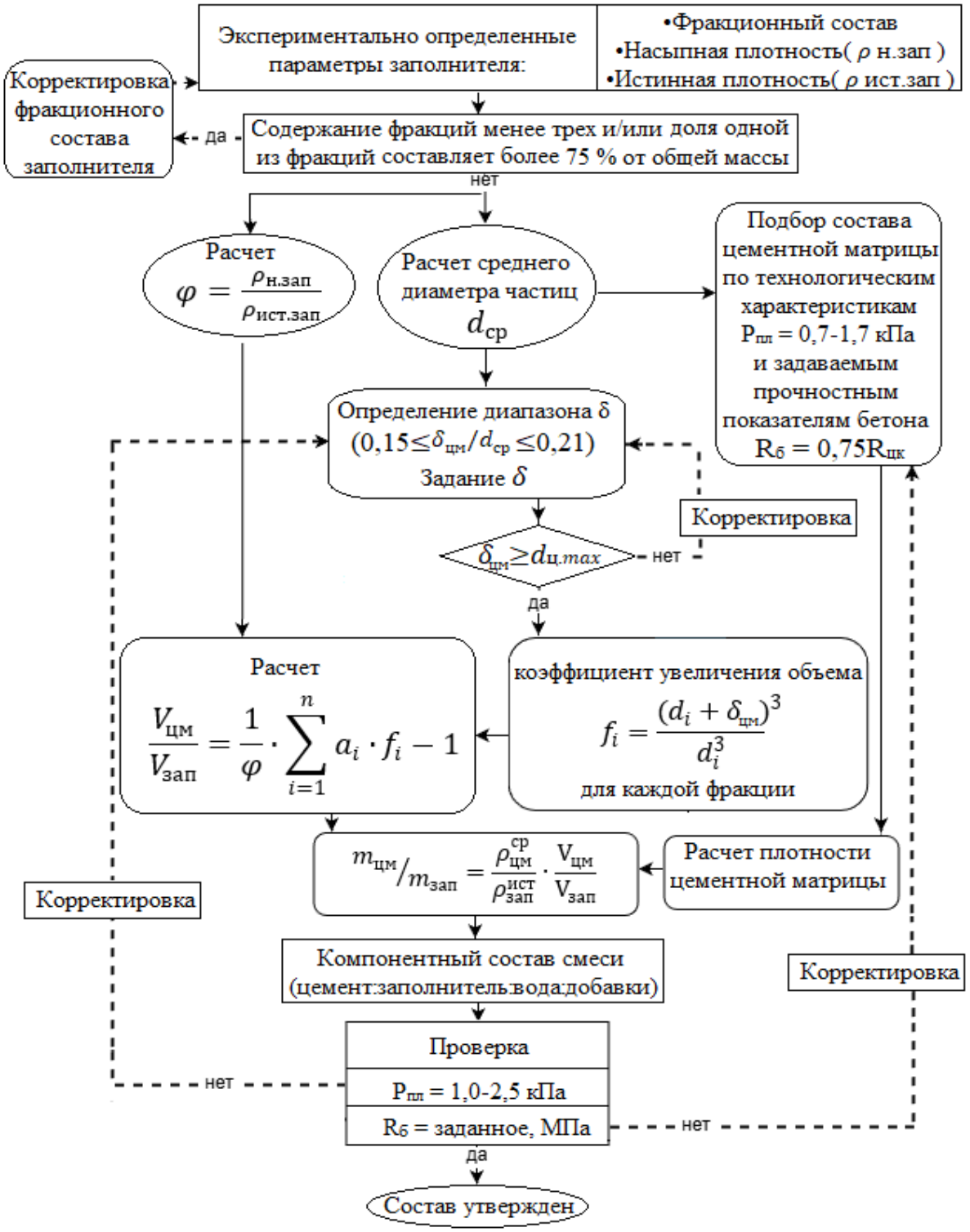


Рисунок 6 – Алгоритм проектирования состава смеси мелкозернистого бетона

- экспериментальное определение характеристик исходного заполнителя (фракционный состав, истинная и насыпная плотности); корректировка состава заполнителя;

- подбор состава цементной матрицы по технологическим характеристикам и задаваемым прочностным показателям бетона;

- расчет характеристик заполнителя (средний диаметр частиц ($d_{ср}$) и плотность упаковки частиц (φ) на основании экспериментально определенных истинной и насыпной плотности;

- определение требуемой толщины прослойки цементной матрицы на основании принятого ограничения параметров структуры смеси ($\delta_{цм}/d_{ср}$=0,15-0,21);

- определение коэффициента увеличения объема для каждой фракции;

- определение объемного соотношения элементов структуры смеси;

- расчет массовых соотношений цементной матрицы и заполнителя с учетом конкретной средней плотности рекомендуемой матрицы ($\rho_{цм}^{ср}$) и истиной плотности используемого заполнителя ($\rho_{з}^{ист}$);

- экспериментальное подтверждение технологических характеристик мелкозернистой смеси, изготовленной на основании подобранного состава;

- проверка бетона на соответствие заданной прочности.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальной апробации разработанной методики и алгоритма проектирования для четырех составов декоративных мелкозернистых бетонов для 3D-печати (таблица 4) с имитацией различных текстур природного камня, что достигалось за счет использования цветных заполнителей и окрашивания цементной матрицы. При этом состав цементной матрицы принимался постоянным.

Таблица 4 – Запроектированные составы декоративных мелкозернистых бетонов для 3D-печати

Наименование состава	Массовые доли компонентов смеси, г						
	Зап.	Цементная матрица (ЦМ)					
		Ц	В	СП	КМ	ЖС	П
ЦМ – П	1 000	816	261	9,8	1,6	1,6	-
ЦМ – ГО	1 000	816	261	9,8	1,6	1,6	-
ЦМ – ПК – ГО – С	1 000	833	281	10,2	1,7	1,7	1,7
ЦМ – ПЗ – ГО – З	1 000	823	272	9,9	1,65	1,65	1,65

Условные обозначения: ЦМ – цементная матрица, Зап. – заполнитель (П – кварцевый песок, ГО – гранит орех, С – сланец терракотовый, З – змеевик), Ц – цемент, В – вода, СП – суперпластификатор, КМ – камедь ксантановая, ЖС – жидкое стекло, П – пигмент, ПК – пигмент красный «ТР-303», ПЗ – пигмент зеленый Deqing tongchem CO

Технологические и реологические характеристики смесей всех запроектированных составов находятся в диапазоне значений, необходимом для эффективной строительной 3D-печати (таблица 5). Возможность осуществлять технологический процесс печати обеспечена сохранностью работоспособности смесей до 30 мин, начало схватывания наступает не ранее 75 минут при температуре окружающей среды от 0 °С до 30 °С.

Таблица 5 – Реологические и технологические характеристики декоративных мелкозернистых смесей для 3D-печати

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 – П	2,4	1,1	45,6	0,06	2,4
ЦМ – ГО	1,2	1,4	42,8	0,08	1,2
ЦМ – ПК – ГО – С	2,4	1,9	42,0	0,05	2,4
ЦМ – ПЗ – ГО – З	1,7	2,4	35,1	0,05	1,7
Граничный диапазон характеристик	1,0-2,5	1-3	≥ 30	$\leq 0,10$	1,0-2,5

Комплексная оценка свойств декоративных бетонов запроектированных составов (таблица 6) позволяет прогнозировать их высокий эксплуатационный потенциал, определяемый их высокой прочностью и физико-климатической стойкостью. Достигнутые показатели свойств обусловлены высокой скоростью и достигаемыми значениями степени гидратации цемента, которая к уже 1 суткам составляют не менее, чем 80 %, а к 28 суткам – 84-95 %; а также низкой пористостью, высокой плотностью и однородностью структуры новообразований цементирующего вещества, что подтверждается результатами сканирующей электронной микроскопии (рисунок 7).

Таблица 6 – Свойства декоративных мелкозернистых бетонов для 3D-печати

Характеристика композита	Наименование состава			
	ЦМ – П	ЦМ – ГО	ЦМ – ПК – ГО – С	ЦМ – ПЗ – ГО – З
Прочность на сжатие при продолжительности твердения 1 сутки, МПа	47,7	44,8	41,6	36,5
Степень гидратации к 1 суткам, %	81	83	81	80
Прочность на сжатие при продолжительности твердения 28 суток, МПа	67,9	60,9	63,8	54,5
Степень гидратации к 28 суткам, %	84	91	88	95
Прочность на сжатие при продолжительности твердения 1 год, МПа	82,6	76,9	70,4	75,0
Естественная влажность, %	8,24	8,80	8,58	8,18
Полное водопоглощение, %	8,48	9,13	9,39	9,10
Эксплуатационное водопоглощение, %	0,2	0,3	0,8	0,9
Морозостойкость, циклы	200	200	200	200
Деформации усадки (в эксплуатационном диапазоне обезвоживания), мм/м	1,4	1,7	1,4	1,3
Деформации усадки (при глубоком обезвоживании), мм/м	1,6	2,2	1,6	1,6

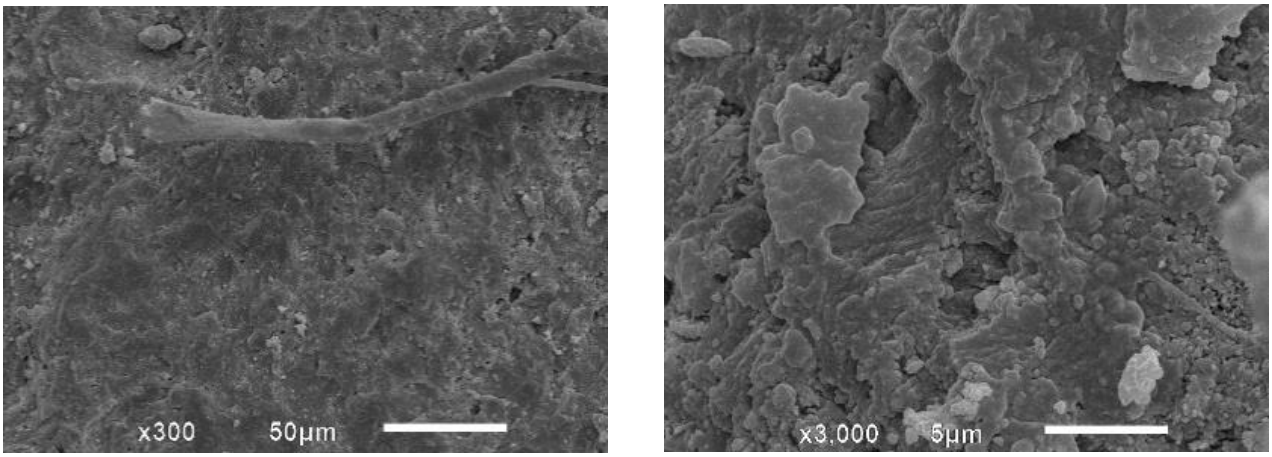


Рисунок 7 – Типичная структура цементирующего вещества декоративных композитов

В пятой главе изложены результаты опытно-промышленной апробации результатов исследования, представлены прикладные разработки с оценкой их технико-экономической эффективности.

Опытно-промышленная апробация запроектированных составов декоративных бетонов при производстве 3D-печатных малых архитектурных форм включала следующие шаги: выбор и создание моделей для печати, подготовка оборудования, подготовка смеси для печати, процесс печати. Контроль качества смеси осуществляли после ее изготовления и через каждые 10 мин в процессе печати при помощи конического пластометра.

В результате апробации доказано, что разработанные составы пригодны к промышленной 3D-печати, так как обеспечена воспроизводимость заданных технологических характеристик, бездефектность и постоянство сечения экструзионных слоев, формоустойчивость напечатанных изделий при непрерывной укладке не менее 20 слоев (рисунок 8).



Рисунок 8 – Фото 3D-печатного вазона из декоративного мелкозернистого бетона

На основании результатов опытно-промышленной апробации, разработаны рекомендации по технологии изготовления строительных изделий методом 3D-печати, предложения к технологическому регламенту производства сухих строительных смесей для 3D-печати, которые внедрены при производстве сухих строительных смесей (ООО «СТРОЙСАНТЕХМОНТАЖ», г. Воронеж), малых архитектурных форм (ООО «БетоникАРТ», г. Белгород).

Технико-экономическая эффективность разработанных решений оценена на примере производства малых архитектурных форм.

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 сутки –54-68 МПа, после1 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. Технико-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 основных работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Slavcheva G., **Britvina E.** 3D-printable artificial marble // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – № 3 (111). – Art. 11115.
2. Славчева Г. С., **Бритвина Е. А.**, Шведова М. А., Юров П. Ю. Влияние дозировки и гранулометрии наполнителей на показатели экструдируемости смесей для 3D-печати // Строительные материалы. – 2022. – № 1-2. С. 21-29.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus

3. 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.

Публикации в отечественных индексируемых изданиях

4. 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.
5. **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.
6. 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.
7. 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.

Публикации в других изданиях

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

9. **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.

Патент РФ

10. Патент № 2767805 C1 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.

Подписано в печать 20.10.26 г. Формат 60х84 1/16.
Бумага писчая. Усл. п. л. 1,4. Тираж 80 экз. Заказ № 149
Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84