

На правах рукописи



**БАБЕНКО ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСЕЙ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж)

Научный руководитель: **Славчева Галина Станиславовна**  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Тараканов Олег Вячеславович**, доктор технических наук, профессор, советник РААСН, декан факультета «Управления территориями» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

**Петропавловская Виктория Борисовна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Производство строительных изделий и конструкций» ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»**

Защита диссертации состоится 20 декабря 2024 года в 14<sup>00</sup> 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. 10 бизнес-инкубатора.  
тел/факс: (473) 271-53-21

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

Автореферат разослан «23» октября 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Макеев Алексей  
Иванович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы** определяется тем, что развитие аддитивных технологий в строительстве полностью соответствует реализации приоритета 20а «переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта» Стратегии научно-технологического развития РФ, так как является цифровой, роботизированной, интеллектуальной производственной технологией. Одновременно согласно постановлению правительства РФ от 14.07.2021 г. об утверждении «Стратегии развития аддитивных технологий в РФ на период до 2030 г.» строительная 3D-печать как «автоматизированное возведение жилых домов, зданий и других объектов, а также изделий строительного назначения» включена в перечень ключевых мероприятий для развития Стратегии.

В настоящее время созданы материалы для печати, аппаратурное оформление данного способа доведено до промышленного выпуска комплектов оборудования рядом российских и зарубежных фирм. Однако, в действующей нормативной базе РФ отсутствуют нормативные документы, регламентирующие весь жизненный цикл строительной 3D-печати. Действующие стандарты для аддитивного строительного производства имеют следующие недостатки, ограничивающие их применимость:

- не представлены конкретные численные значения и параметрические ряды показателей качества сухих смесей, растворных (бетонных) смесей, а также затвердевшего бетона (строительного раствора) для аддитивных технологий;

- требования к технологическим характеристикам смесей являются неполными, так как регламентируют контроль подвижности, стойкость к оплыванию, прокачиваемости, срокам начала и окончания схватывания, водоудерживающей способности. Нет требований к экструдированности и формоустойчивости, как принято в мировой науке и практике аддитивного строительного производства.

Для решения сложившейся проблемы необходимо обосновать такие технологические требования к смесям и методам их оценки, которые обеспечат безопасную печать строительных объектов с минимумом дефектов. Это послужит основой для обновления существующей нормативной базы применительно к производству и приемке работ, выполняемых при производстве и контроле качества материалов для аддитивного строительного производства (3D-печати).

**Степень разработанности темы.** Фундаментальные подходы к описанию пластического поведения и течения технических материалов изложены в классических трудах Ф. Эйриха, Г. Шрамма, П.А. Ребиндера, Круглицкого Н.Н., Михайлова Н.В., Урьева Н.Б. В трудах школы П.А. Ребиндера впервые получена полная реологическая кривая течения дисперсных систем, которая интерпретирована с позиций состояния их структуры. Данный структурный подход позволил решить задачи управления реологическими свойствами различных цементных систем, применить решения в технологии бетонов. Современным исследованиям в области аддитивных строительных технологий посвящены работы Buswell R., Engmann J., Kim I.G., Lootens D., Lim S., Perrot A., Rehman A.U., Roussel N., Пухаренко Ю.В., в них рассмотрены вопросы изучения и моделирования поведения вязко-пластичных смесей в технологических процессах 3D-печати. В результате разработаны научные методы сдвигающей реометрии, предложены критерии оценки перекачиваемости, экструдированности и формоустойчивости

смесей. Однако использование критериев и методов сдавливающей реометрии в практике 3D-печати затруднено из-за их технической сложности, а технические методы не нормированы.

**Объект исследования** – цементные смеси для строительной 3D-печати, готовые к использованию и рассматриваемые как вязкопластичные дисперсные системы «дисперсная фаза + дисперсионная среда».

**Предмет исследований** – реологическое поведение и свойства смесей для строительной 3D-печати и методы их оценки в условиях, моделирующих технологические процессы экструзии и безопалубочной послойной укладки.

**Научная гипотеза.** Оценка реологического поведения, состояния структуры и свойств цементных смесей как вязкопластичных дисперсных систем методами, моделирующим их пластическое поведение в технологических процессах 3D-печати, позволит обосновать количественные критерии пластичности и формоустойчивости. На этом основании будут разработаны технические методы оценки технологических характеристик смесей для 3D печати, их адекватность будет доказана верификацией научными методами сдвиговой и сдавливающей реометрии.

**Целью диссертационной работы** является научное обоснование и разработка комплекса критериев и методов оценки технологических свойств смесей для 3D-печати на основе исследования их реологического поведения и свойств.

В соответствии с поставленной целью сформулированы следующие задачи исследований.

1. Проанализировать методы оценки реологических и технологических свойств смеси для 3D печати.
2. Разработать концепции оценки технологических свойств смесей для 3D-печати с учетом особенностей процесса.
3. Разработать методику и факторное пространство исследования.
4. Исследовать реологическое поведение и свойства смесей для 3D печати и разработать критерии их оценки.
5. Обосновать требования к техническим методам оценки технологических характеристик на основе их верификации реологическими критериями и оценки качества 3D-печатных конструкций.
6. Разработать предложения по техническим методам определения текучести, пластичности, формоустойчивости и требования к диапазону их значений.

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

1. Государственное задание по проекту 7.10781.2018/11.12 «Разработка концепции и технологической платформы создания строительных композитов для 3D-печати» (2018 – 2019 гг.).
2. Программа «СТАРТ-1» 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 гг.).
3. Грант Российского научного фонда, проект 22-19-00280 «Разработка принципов создания армированных композитов для строительных 3D-аддитивных технологий на основе моделирования и экспериментального изучения механического поведения и свойств» (2022- 2024 гг.).

4. НИОКР «Исследование и комплексная оценка технических свойств смесей и композитов для аддитивных строительных технологий (3D-печати)» (Договор № 32312234196 – 1/2023 с «ФАУ ФЦС»).

#### **Научная новизна работы.**

На основании изучения пластического поведения смесей методом сдавливающей реометрии с постоянной скоростью деформирования (метод N. Roussel'я) типизированы модели реологического поведения в условиях действия нормальных напряжений. С точки зрения устойчивости структуры выделены системы трех типов (непластичные, пластичные и текучие). Для обеспечения способности к экструзии уточнен диапазон значений критерия пластичности  $K_i(I) = 1,0-2,0$  кПа, при достижении которого в вязкопластичной дисперсной системе происходит переход от устойчивого состояния к началу разрушения коагуляционных контактов в структуре и вязкопластическому течению. Данный критерий предлагается в качестве оценки предела ползучести системы  $\tau_k$  (по Шведову) в условиях действия нормальных напряжений.

Разработан и апробирован реометрический метод изучения реологического поведения и свойств вязко-пластичных систем при сдавливании с постоянной скоростью нагружения, основанный на моделировании их упруго-пластического поведения в условиях нарастания нагрузки при послойной укладке смеси в процессе 3D-печати. На основании данного метода обоснованы три критерия формоустойчивости смесей для 3D-печати, которые предложены как оценочные характеристики пределов текучести в условиях действия нормальных напряжений:

- структурная прочность  $\sigma_0$  (оценка статического предела текучести  $\tau_{k1}$ ), которая характеризует способность вязко-пластичной смеси воспринимать нагрузку без деформирования напечатанного слоя;

- пластическая прочность  $\sigma_{пл}$  (оценка бингамовского предела текучести  $\tau_{k2}$ ), которая характеризует способность вязко-пластичной смеси воспринимать нагрузку без нарушения сплошности слоя;

- относительная деформация слоя смеси до момента нарушения его сплошности  $\Delta_{пл}$ .

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработаны научно-обоснованные требования к оценке реологического поведения и свойств смесей для 3D-печати в условиях моделирующих сдавливающие воздействия при экструзии и послойной укладке;

2. Разработаны критерии оценки экструдированности и формоустойчивости смесей и требования к диапазону их значений, обеспечивающих отсутствие дефектов на поверхности и устойчивость строительных объектов в процессе 3D-печати;

3. Обоснован новый технический метод контроля формоустойчивости смесей для 3D-печати, который основан на фиксации продольных и поперечных деформаций образца смеси  $d_0 = 50$  мм и высотой  $h_0 = 50$  мм при нагружении его массой 2 кг. В качестве критерия формоустойчивости предложен коэффициент деформирования образца смеси, рассчитываемый как отношение поперечных деформаций образца к продольным после нагружения;

4. Обоснованы показатели технологических характеристик смесей и требования к диапазону значений, верифицированные реологическими исследованиями:

- показатель текучести, определяемый по диаметру расплыва смесей;

- показатель пластичности, определяемый по сопротивлению пенетрации, при котором обеспечивается бездефектная укладка слоя при экструзии, требования к диапазону значений пластичности определяются типом принтера;

- показатель формоустойчивости, определяемый по коэффициенту деформирования слоя при погружении образцов смеси через 10 минут после ее приготовления.

Предложена процедура и алгоритм контроля качества смесей в технологическом цикле 3D-печати предложенным комплексом методов.

Для аддитивного строительного производства (3D-печати) разработаны предложения по классификации, требования к маркам смесей в зависимости от значений показателей текучести, пластичности и формоустойчивости.

**Методология и методы исследования** основаны на структурном подходе к изучению реологического поведения цементных смесей для 3D-печати как вязко-пластичных дисперсных систем; на системном, комплексном применении методов сдвиговой и сдвливающей реометрии; на верификации предложенных технических методов оценки технологических характеристик смесей научными методами сдвиговой и сдвливающей реометрии; на статистическом анализе полученных данных. Прочностные характеристики 3D-печатных композитов определяли в соответствии со стандартными методами определения прочности бетонов по контрольным образцам.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

Результаты исследований реологического поведения вязко-пластичных цементных смесей в условиях, моделирующих действие технологических нагрузок в процессе 3D-печати.

Критерии и диапазон значений реологических показателей пластичности и формоустойчивости.

Результаты экспериментальных исследований влияния технологических характеристик смесей на качество модельных и полноразмерных 3D-печатных конструкций.

Требования к технологическим значениям текучести, пластичности и формоустойчивости смесей для аддитивного строительного производства (3D-печати).

Требования к оперативно-техническим методам и процедуре контроля технологических характеристик смесей для аддитивного строительного производства (3D-печати).

**Степень достоверности полученных результатов.** Испытания реологических и физико-механических свойств, а также оценка качества напечатанных конструкций проводились на современном аттестованном оборудовании в Центре коллективного пользования (ЦКП) имени профессора Ю. М. Борисова ВГТУ. Полученные данные не отрицают общепризнанные факты и исследования других ученых. Серия экспериментальных исследований успешно проверена на практике в производственных условиях.

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты диссертационного исследования были представлены на следующих конференциях: VII Международный симпозиум «APCSCE 2018» «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (НГАСУ, Новосибирск, 2018); Всероссийская научно-техническая конференция «Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций» (МГУ им. Н.П. Огарева, Саранск, 2019); VI Международная научно-практическая конференция «ВМ-моделирование в задачах строительства и архитектуры» (СПбГАСУ, Санкт-Петербург, 2023); V Международная научно-техническая конференция «International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE-2024)» (ВлГУ, Владимир, 2024 г.); ежегодная научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов ВГТУ (Воронеж, 2018-2024).

**Внедрение результатов работы.** Результаты научных исследований подтвердились при выпуске и контроле качества опытно-промышленной партии сухой смеси для 3D-печати по заказу ООО «ЗД-СТРОЙДИЗАЙН»; опытной партии малых архитектурных форм на промышленной площадке ООО «АрконКонстракшн».

Требования к технологическим свойствам смесей и комплексу технических методов их контроля (в рамках Договора № 32312234196 – 1/2023 с «ФАУ ФЦС») предложены для разработки новых ГОСТ Р «Строительные смеси и композиты для аддитивного производства. Классификация и общие технические требования»; ГОСТ Р «Строительные смеси и композиты для аддитивного производства. Методы испытаний».

Результаты диссертационных исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «ВГТУ» при подготовке магистров направления 08.04.01 «Строительство», профиля «Экспертиза качества и маркетинг строительных материалов».

**Личный вклад автора.** Автором самостоятельно сформулированы цель и задачи исследования, выполнен аналитический обзор литературных источников, произведено планирование и непосредственное выполнение экспериментальных исследований, а также проведены обработка, анализ и обобщение полученных результатов. Принято участие в апробации результатов работы.

**Публикации.** Основные результаты и положения диссертационных исследований представлены в 10 публикациях, из которых 3 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ, 2 в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus, получено 7 патентов и 1 свидетельство на «ноу-хау».

**Структура и содержание исследования.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 221 страницах, содержит 60 рисунков и фотографий, 45 таблиц, 7 приложений. Список литературы включает 119 наименований.

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

17. Развитие системы контроля и оценки качества строительных материалов и изделий;

8. Разработка, исследование и совершенствование методов создания строительных материалов посредством автоматизированных и роботизированных, нано-, био-, аддитивных, цифровых и «зеленых» технологий.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы, показана степень её проработанности, сформулированы цели и задачи исследования, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен обзор существующих научных и технических методов оценки технологических характеристик смесей для 3D-печати с выделением их достоинств и недостатков. Произведена систематизация критериев оценки реологического поведения вязко-пластичных смесей применительно к стадиям процесса 3D-печати. Выявлено, что основной проблемой данного направления является отсутствие общепризнанных и нормированных технических критериев и методов оценки технологических характеристик смесей. Сформулирована научная концепция исследований, заключающаяся в том, что обоснование методов и критериев

оценки технологических характеристик смесей будет основана на изучении их реологического поведения методами сдвиговой и сдвливающей реометрии с оценкой изменения состояния структуры. Требования к техническим методам оценки технологических характеристик будут разработаны на основе их верификации реологическими критериями. Это позволит обосновать физический смысл разрабатываемых технических методов и критериев и доказать их адекватность.

Во второй главе охарактеризованы сырьевые материалы и состава исследуемых систем (табл. 1), представлено факторное пространство каждого этапа экспериментов (табл. 2), охарактеризованы методы исследований и испытаний реологических характеристик для проведения экспериментальных испытаний.

Таблица 1 – Характеристики исследуемых систем

Обозначение системы	Компонентный состав систем*
Модельные системы	
Ц-В	Цемент (Ц), вода (В), В/Ц = 0,24-0,28
Ц-В-СП	Цемент (Ц), вода (В), суперпластификатор (СП) 0,4%, В/Ц = 0,25
Ц-В-СП-МКЛ	Цемент (Ц), вода (В), суперпластификатор (СП) 0,4%, метакаолин (МКЛ) 2%, В/Ц = 0,25
Смеси для 3D-печати	
Ц – В – МКЛ – ИМ (эталон)	Цемент (Ц), вода (В), метакаолин (МКЛ) 2%, известняковая мука (ИМ), соотношение по массе Ц : ИМ = 1:1, фибра (Ф) 0,5%, В/Ц = 0,38-0,49
Ц – В – СП – МКЛ – П (патент RU 2729085)	Цемент (Ц), вода (В), суперпластификатор (СП) 0,4%, метакаолин (МКЛ) 2%, песок (П) соотношение по массе Ц : П = 1:1,25, фибра (Ф) = 0,5%, В/Ц = 0,27-0,32
Ц – В – СП – МКЛ – ИМ (патент RU 2729283)	Цемент (Ц), вода (В), суперпластификатор (СП) = 0,4%, метакаолин (МКЛ) 2%, известняковая мука (ИМ), соотношение по массе Ц : ИМ = 1:1, фибра (Ф) 0,5%, В/Ц = 0,37-0,41

\*Дозировки добавок и фибры указаны в % от массы цемента.

Для всех исследованных систем фактором варьирования выступало В/Ц отношение, так как от него зависит содержание жидкой фазы и, соответственно, значения показателей структурной прочности и агрегативной устойчивости смесей как вязко-пластичных дисперсных систем.

На первом этапе эксперимента выполнялось обоснование и разработка методов реометрии при сдвливании. Изучение реологического поведения и оценка пластичности смесей в условиях, моделирующих ее поведение смеси экструзии, производилось методом сдвливания с постоянной скоростью деформирования 5 мм/с (метод Rousel'я). Для оценки реологического поведения, в условиях моделирующих послойную укладку, разработан и апробирован метод оценки формоустойчивости при сдвливании с постоянной скоростью нагружения 0,5 Н/с, что соответствует средней скорости возрастания нагрузки при печати строительных объектов промышленно производимыми принтерами.

При проведении сдвливающих тестов формировали цилиндрические образцы смесей размером  $R = h_0 = 25$  мм, которые помещались между двумя гладкими пластинами, диаметр которых соответствовал размеру образца.

Для оценки пластичности по полученным в процессе испытаний с постоянной скоростью деформирования кривые «приведенной нагрузка  $F^*$  – относительное изменение высоты образца  $h_i/R$ »; в точке перегиба кривой определялась величина предела пластичности  $K_i(I)$ :

$$K_i\left(\frac{h_i}{R}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} F^* . \quad (1)$$



Таблица 2 – Матрица этапов исследования

Обозначение системы	Исследуемые характеристики	Контролируемые показатели	Применяемые методы идентификации (используемые приборы)
Первый этап эксперимента			
Ц–В	Пластичность и формоустойчивость	Структурная прочность, пластическая прочность, относительные пластические деформации, оценка предела пластичности	Методы сдвливающей реометрии (универсальная испытательная система INSTRON 5982).
Второй этап эксперимента			
Ц-В	Классические реологические характеристики	Статическая вязкость, динамическая вязкость, статический предел текучести, предел текучести)	Методы сдвиговой реометрии (ротационный вискозиметр RHEOTEST 4.1).
Ц-В-СП			
Ц-В-СП-МКЛ	Пластичность и формоустойчивость смеси	Структурная прочность, пластическая прочность, относительные пластические деформации, оценка предела пластичности	Методы сдвливающей реометрии (универсальная испытательная система INSTRON 5982).
Третий этап эксперимента			
Ц – В – МКЛ – ИМ (12 систем)	Пластичность и формоустойчивость смеси	Структурная прочность, пластическая прочность, относительные пластические деформации, оценка предела пластичности)	Методы сдвливающей реометрии (универсальная испытательная система INSTRON 5982).
Ц – В – СП – МКЛ – ИМ (5 систем)			
Ц – В – СП – МКЛ – П (5 систем)			
Четвертый этап эксперимента			
Ц – В – СП – МКЛ – ИМ (5 систем) Ц – В – СП – МКЛ – П (11 систем)	Пластичности и формоустойчивости смеси	Сопrotивление пенетрации, коэффициент деформирования, диаметр расплыва	Технологические тесты (пенетрометр, встряхивающий столик, конус, линейка, калибровочные гири)
	Качество напечатанных объектов	Коэффициент деформирования слоя, относительные продольные деформации слоя, относительные поперечные деформации слоя	Фотофиксация, оценка продольных и поперечных деформаций слоев, вертикальных деформаций печатного элемента (линейка)
	Физико-механические свойства слоистых образцов	Прочность при сжатии, прочность сцепления слоев	Физико-механические испытания по ГОСТ 18105-2018

Для оценки формоустойчивости сдвливание с постоянной скоростью нагружения проводилось до разрушения образца, в процессе испытания фиксировались кривые «относительное перемещение  $\Delta$  – время  $t$ » и «нагрузка  $\sigma$  – перемещение  $h_i$ ». В точках перегиба кривых рассчитывали значения пластической прочности:

$$\sigma_i = \frac{P}{\pi R^2} \quad (2)$$

На втором этапе эксперимента выполнялось изучение реологического поведения цементных систем методами сдвигавшей и сдвиговой реометрии. Задачей второго этапа эксперимента являлось определение численных критериев:

- пластичности, обеспечивающей формирование бездефектного слоя;
- формоустойчивости, необходимой для безопалубочной укладке слоев.

Разработанный метод сдвигавшей реометрии и полученные характеристики верифицировались методами классической сдвиговой реометрии. Для получения полной реологической съемки на ротационном вискозиметре производилась в двух режимах: CS с использованием измерительной система типа Серле, в которой задается напряжение и определяется величина скорости сдвига; CR с использованием измерительной система типа Куэтта, в которой задается скорость сдвига и определяется величина напряжения сдвига.

На третьем этапе эксперимента производилась разработка оперативно-технических методов оценки технологических характеристик смесей для 3D-печати. Задачей данного этапа являлась разработка требований к методам оценки и диапазону численных показателей пластичности и формоустойчивости. Верификация разработанных оперативно-технических методов осуществлялась при помощи ранее апробированных методов сдвигавшей реометрии.

Четвертый этап эксперимента включал в себя оценку качества 3D-печатных объектов для уточнения требований к значениям технологических характеристик смесей. Уточнение требований производилось по результатам исследования влияния технологических характеристик смесей на качество натуральных и модельных 3D-печатных объектов и прочность образцов, выпиленных из данных объектов.

**Третья глава** посвящена разработке реологических и оперативно-технических методов и критериев оценки пластичности и формоустойчивости на основании изучения реологического поведения смесей.

На основании изучения пластического поведения смесей при сдвигании с постоянной скоростью деформирования типизированы модели реологического поведения в условиях действия нормальных напряжений (рис. 1).

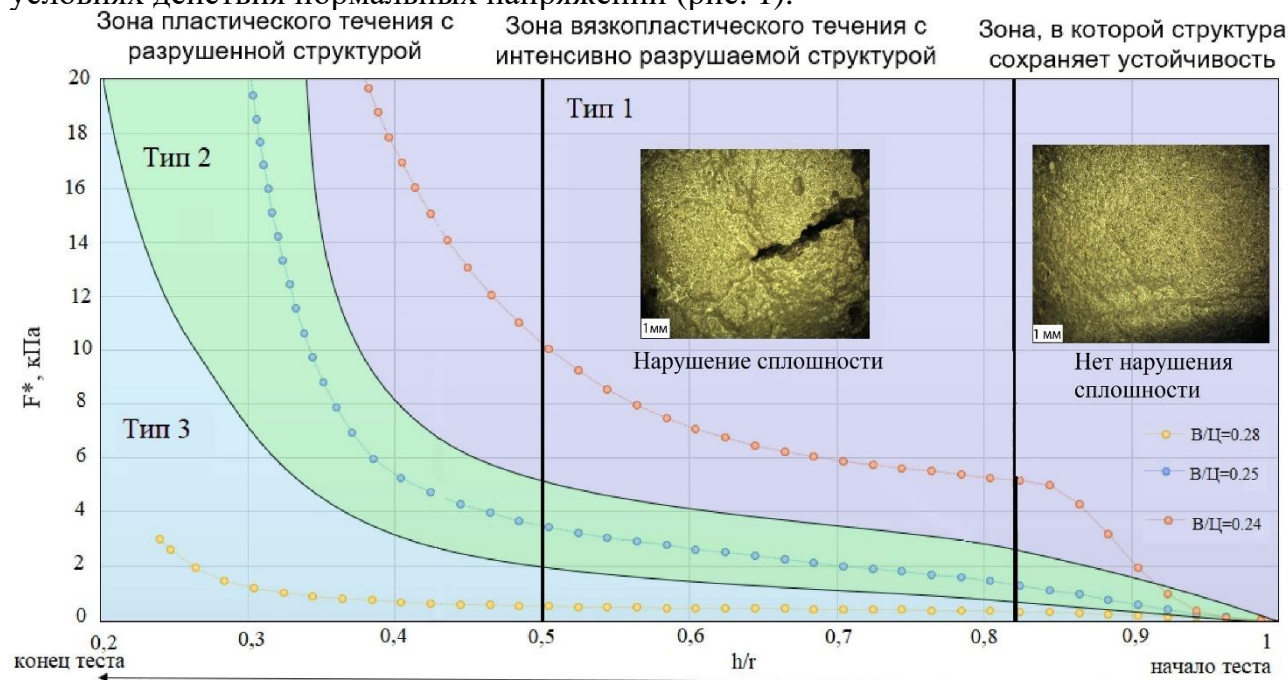


Рисунок 1 – Кривые зависимости приведенной нагрузки  $F^*$  от относительного изменения высоты образца  $h_i/R$

На экспериментальных кривых  $F^* = f(h_i/R)$  выделены три зоны, соответствующие состоянию структуры вязко-пластичных смесей. На первом участке кривой в диапазоне  $\sim 0,8 < h_i/R < 1$  структура сохраняет устойчивость (“plasing phase” согласно квалификации N.Roussel’я). Данный участок соотносится с участком II вязкопластического течения вязко-пластичной дисперсной системы с неразрушенной структурой на кривой П.А. Ребиндера (рис. 2). При возрастании напряжений на втором участке  $\sim 0,5 < h_i/R < \sim 0,8$  система пластически деформируется, а её структура теряет устойчивость (“perfect plase response phase”). Данный участок можно соотнести с участком III вязкопластического течения с интенсивно разрушаемой структурой на кривой П.А. Ребиндера (модель Бингама). В третьей зоне наблюдается резкое возрастание нагрузки и интенсификация течения  $h_i/R < \sim 0,5$  связаны с полным разрушением структуры цементной системы. Исходя из этого, предложенный N. Roussel’ем экспериментальный критерий пластичности  $K_i(I)$  предлагается использовать как оценку предела ползучести системы  $\tau_k$  по модели Шведова.

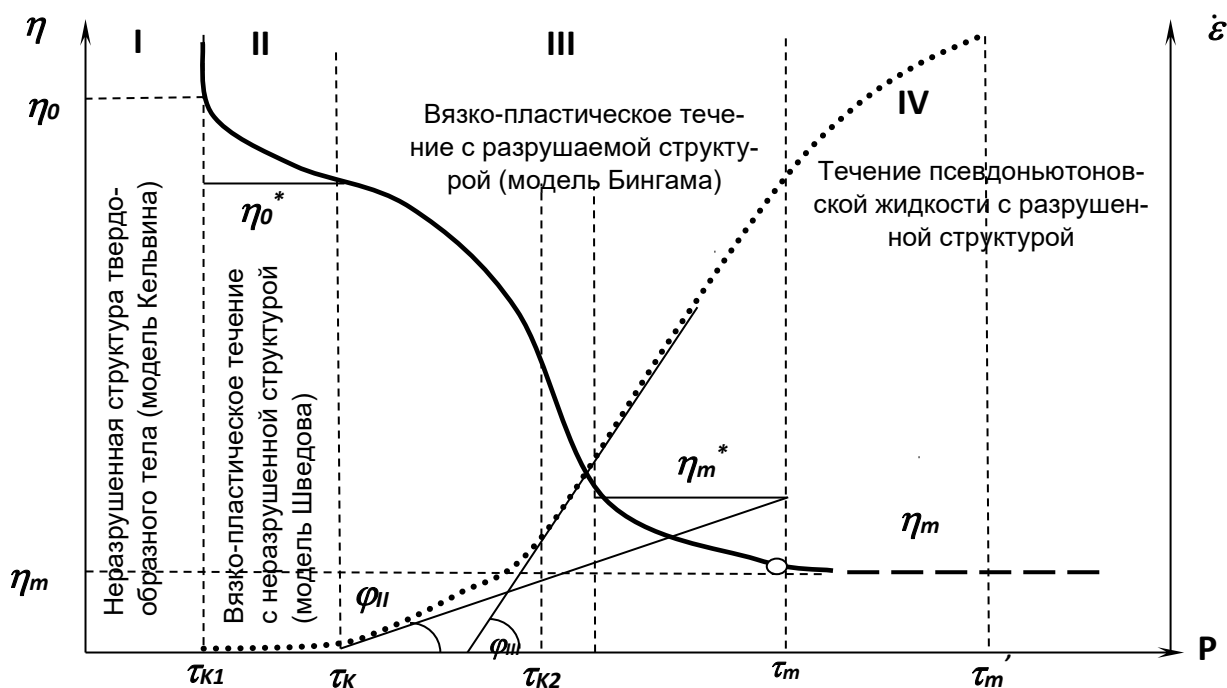


Рисунок 2 – Полная реологическая кривая течения дисперсных систем П.А. Ребиндера

обозначено:  $\tau_{k1}$  - истинный предел текучести (предел упругости);  $\eta_0^*$  – пластическая вязкость;  $\eta_0$  – наибольшая предельная вязкость неразрушенной структуры;  $\eta_m^*$  – эффективная динамическая вязкость;  $\tau_{k2}$  – условный динамический (бингамовский) предел текучести;  $\tau_k$  – напряжение сдвига, после которого наступает вязкопластическое течение (предел ползучести);  $\tau_m$  – пластическая прочность

На основании изучения пластического поведения типизированы модели реологического поведения в условиях действия нормальных напряжений. С точки зрения устойчивости структуры в данных условиях цементные вязко-пластичные системы предложено разделить на три типа:

*Система типа I* имеет выраженный горизонтальный участок пластического деформирования между двумя точками перегиба. Величина приведенной нагрузки  $F^*$ , необходимая для перехода из устойчивого состояния к течению, составляет  $\sim 6$  кПа. Системы с таким типом реологического поведения неспособны к вязкопластическому течению с неразрушенной структурой в достаточно широком диапазоне внешней

нагрузки. Следовательно, данные системы недостаточно пластичны для формирования бездефектного слоя в процессе экструзии.

*Система типа II* характеризуется отсутствием ярко выраженных переходов между участками кривой. Величина  $F^*$  в первой точке перегиба, соответствующая началу пластического течения, составляет  $\sim 1-2$  кПа, переход в состояние течения с разрушенной структурой происходит при значениях  $F^* = \sim 5$  кПа. Система данного типа обладает способностью к вязкопластическому течению без разрушения структуры в достаточно широком диапазоне внешней нагрузки, то есть обладает способностью к экструзии именно вследствие их достаточной пластичности.

*Система типа III* характеризуется слабой выраженностью участка устойчивого состояния структуры. Система теряет устойчивость, приобретает текучесть в начальный момент нагружения при  $F^* < 0,5$  кПа, поэтому не обладает необходимыми упруго-вязкопластическими свойствами и устойчивостью для формирования устойчивого экструзионного слоя.

Установлено, что для обеспечения способности смеси к экструзии значения предложенного N. Roussel'ем критерия пластичности  $K_i(I)$  должны составлять  $1,0 - 2,0$  кПа.

В результате испытаний смесей на формоустойчивость с использованием разработанного метода реометрии при сдвливании с постоянной скоростью нагружения на полученных тестовых кривых «относительное перемещение  $\Delta$  – время  $t$ » (рис. 3) выделены три основных участка:

- «зона устойчивости», которая характеризует отсутствие деформаций смеси при действии нагрузок;
- «зона пластического деформирования», которая характеризует способность смеси деформироваться без нарушения сплошности структуры;
- «зона разрушения структуры», в которой происходит полная потеря сплошности структуры смеси.

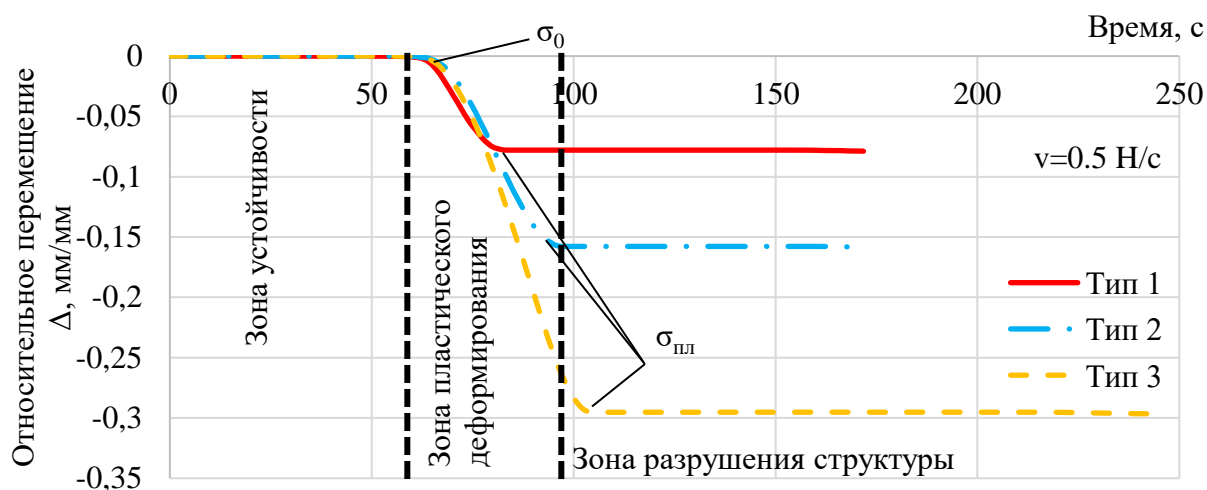


Рисунок 3 – Тестовые экспериментальные кривые «относительное перемещение  $\Delta$  – время  $t$ » для системы «цемент + вода». Обозначено:

— Тип 1 (В/Ц=0,24); —•— Тип 2 (В/Ц=0,25); - - - Тип 3 (В/Ц=0,28);

На кривых «напряжение  $\sigma$  – перемещение  $h_i$ » (рис. 4) выделяются пики падения нагрузки, которые соответствуют началу потери сплошности структуры, то есть началу ее разрушения. Данные точки соответствуют началу зоны разрушения структуры на кривых « $\Delta - t$ ».

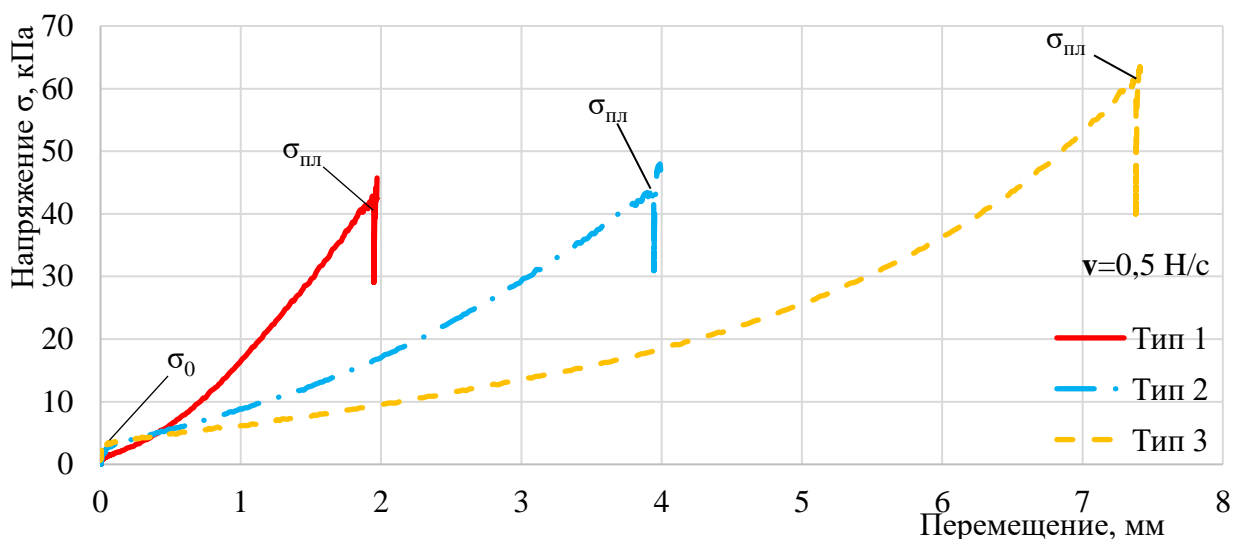


Рисунок 4 – Тестовые экспериментальные кривые

«напряжение  $\sigma$  – перемещение  $h_i$ » для системы «цемент + вода». Обозначено:

— Тип 1 (В/Ц=0,24); —•— Тип 2 (В/Ц=0,25); -.-.- Тип 3 (В/Ц=0,28);

Сопоставление кривой « $\Delta - t$ » с полной реологической кривой П.А. Ребиндера (см. рис. 2) позволяет соотнести зону устойчивости с участком I, когда дисперсная система ведет себя как твердообразное тело с неразрушенной структурой. Величину напряжений  $\sigma_0$ , рассчитанную на границе данной зоны с зоной пластического деформирования, можно соотнести с величиной статического предела текучести  $\tau_{k1}$ .

Зону пластического деформирования на кривой « $\Delta - t$ » можно соотнести с участком II кривой П.А. Ребиндера, соответствующему вязкопластическому течению дисперсной системы с неразрушенной структурой. Величину напряжений  $\sigma_{пл}$ , рассчитанную на границе данной зоны с зоной разрушения структуры, можно соотнести с величиной предела текучести  $\tau_{k2}$  (по Бингаму).

Вид кривых « $\Delta - t$ », « $\sigma - h_i$ » аналогичен для всех трех типов систем, поэтому метод можно использовать как универсальный для оценки формоустойчивости.

Верификация разработанных методов и критериев выполнялась путем сопоставления реологических кривых пластического деформирования цементных систем при сдавливании (действии нормальных напряжений) с полными реологическими кривыми, полученными методом сдвиговой реометрии (рис. 5,6).

Сопоставление реологического поведения при сдвиге и сдавливании позволяет охарактеризовать его как сходный для исследованных систем. Пластифицированная модельная система «Ц – В – СП» характеризовалась низкой вязкостью (табл. 3). Согласно полной реологической кривой, и одновременно, согласно кривой  $F^* = f(h_i/R)$  ее можно охарактеризовать также как систему типа III с повышенной текучестью. Модельная система «Ц – В» характеризовалась высокой вязкостью, на полной реологической кривой происходит практически вертикальное падение вязкости при росте напряжений сдвига, что свидетельствует о неспособности системы к вязкопластическому течению без разрушения структуры. Согласно кривой  $F^* = f(h_i/R)$  данную систему также можно отнести к жесткой системе типа I. Системы «Ц-В-СП-МКЛ» характеризовались достаточно высокой вязкостью. На полной реологической кривой присутствуют наклонные участки изменения вязкости при росте напряжений сдвига, что свидетельствует о способности систем к вязкопластическому течению. При этом согласно кривой  $F^* = f(h_i/R)$

данные системы можно охарактеризовать также как системы типа II, обладающие способностью к пластическому течению с неразрушенной структурой.

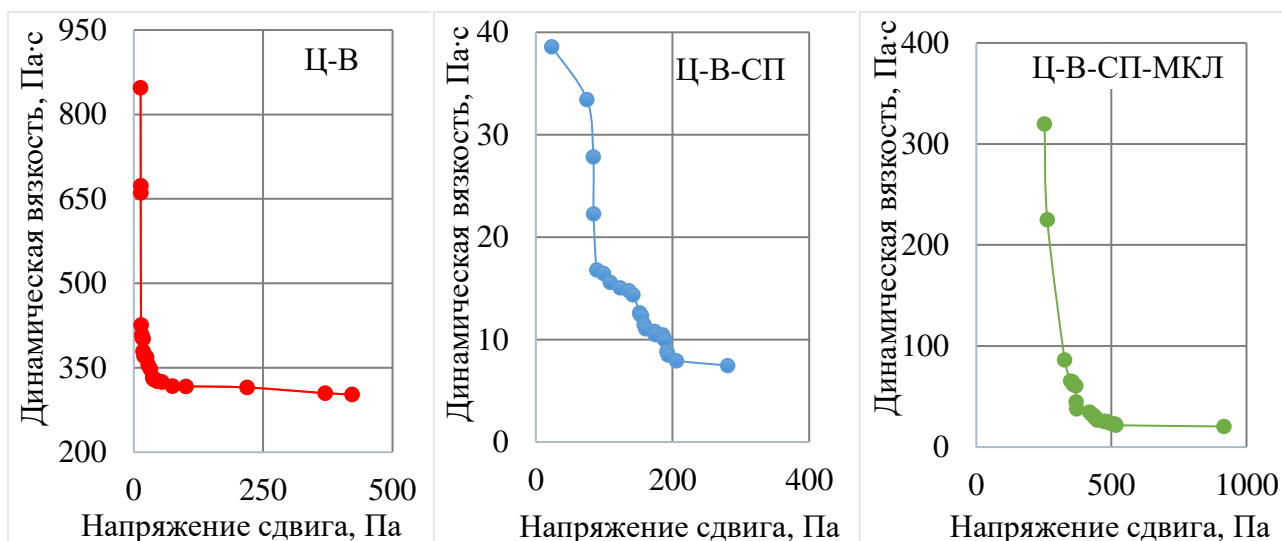


Рисунок 5 – Полные реологические кривые течения модельных систем цементных систем

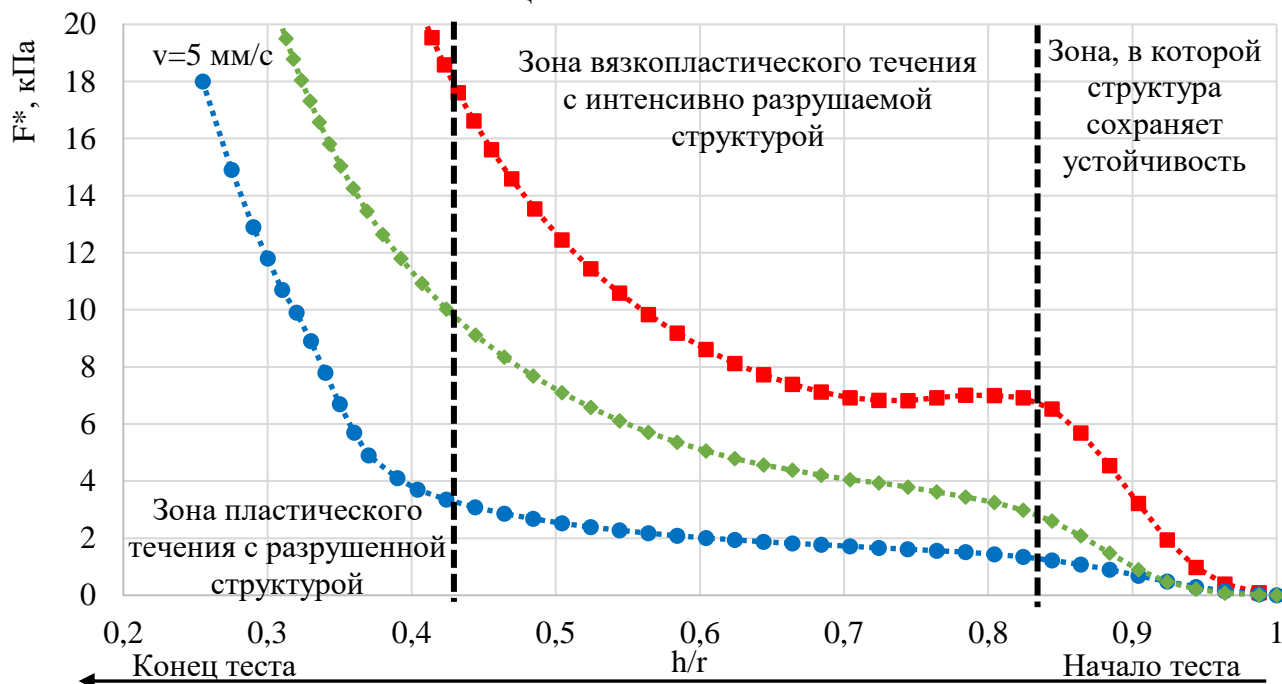


Рисунок 6 - Экспериментальные кривые  $F^* = f(h/R)$  для модельных цементных систем. Обозначено:

■ Ц-В ; ● Ц-В-СП ; ◆ Ц-В-СП-МКЛ

Сопоставление реологического поведения при сдвиге и при сдавливании позволило охарактеризовать его как сходное для исследованных систем, что позволяет предложенные методы исследования реологического поведения вязко-пластичных систем при сдавливании признать адекватными и соответствующими их реологическому поведению при сдвиге. Согласно полученным результатам, подтверждено предположение о том, что методы исследования реологического поведения вязко-пластичных систем при сдавливании можно рассматривать как оценочные характеристики пределов текучести в условиях действия нормальных напряжений.

Таблица 3 – Реологические характеристики цементных систем

По результатам сдвливающей реометрии				
Тип кривых пластичности	Значения критерия пластичности $K_i(I)$ , кПа	Значения критериев формоустойчивости		
		$\sigma_0$ , кПа	$\sigma_{pl}$ , кПа	$\Delta$ , мм/мм
I	>2,0 кПа	6	25	0,01
II	1,0-2,0 кПа	4	36	0,03
III	$\leq 1,0$ кПа	1	53	0,09
По результатам сдвиговой реометрии				
Система	Статическая вязкость $\eta_0$ кПа·с	Динамическая вязкость $\eta$ , кПа·с	Статический предел текучести $\tau_{k1}$ , Па	Предел текучести $\tau_{k2}$ (по Бингаму), Па
Ц-В	847,3	302,7	13,14	31,92
Ц-В-СП	38,6	7,46	23,34	89,08
Ц-В-СП-МКЛ	320,0	2,42	252,6	271,3

По результатам проведенных исследований, в качестве критериев оценки реологического поведения смесей применительно к условиям 3D-печати предлагается использовать:

- критерий пластичности  $K_i(I)$ , принимаемый в качестве оценки предела ползучести  $\tau_k$  (по Шведову), при достижении которого в вязко-пластичной дисперсной системе происходит переход от устойчивого состояния к началу разрушения коагуляционных контактов в структуре и вязкопластическому течению;

- структурную прочность  $\sigma_0$  – в качестве оценки статического предела текучести  $\tau_{k1}$ , определяющий способность смеси сопротивляться деформированию при нагружении;

- пластическую прочность  $\sigma_{pl}$  – в качестве оценки бингамовского предела текучести  $\tau_{k2}$ , характеризующая способность смеси воспринимать нагрузку и деформироваться без нарушения сплошности структуры.

Относительную деформацию слоя смеси до момента нарушения сплошности  $\Delta_{пл}$  (мм/мм) предлагается ввести как дополнительный критерий оценки формоустойчивости, так как оценка деформативности слоя при нагружении принципиально важна в технологии безопалубочной 3D-печати.

Для оценки технологических характеристик смесей для 3D-печати произведена разработка, апробация и верификация следующего комплекса оперативно-технических методов.

Оценку *текучести смесей* для определения способности к перекачиванию предложено оценивать стандартным методом оползания при механических воздействиях (по ASTM C230 с использованием конуса Хегермана (рис. 7а). Обусловлено это тем, что смесь для 3D-печати подвергают большему давлению, чем предельное напряжение сдвига, следовательно, данный эксперимент относится к течению бетона и позволяет оценить вязкость. Для стандартного метода измерений уточнено количество и время перемещений встряхивающего столика (20 раз за 30 с), после этого регистрируются противоположные диаметры расплыва смеси.

Оценку *пластичности смесей* для определения их способности формированию экструзионного слоя предложено оценивать при помощи пенетрометрического теста. Это обусловлено тем, что глубина проникновения, сила или масса, приложенная к проникающему объекту, позволяют измерить предельное напряжение сдвига вязко-пластич-



ной системы. В качестве испытательного прибора апробировано использование пенетрометра универсального Georocket S068 (рис. 7б). Установлено, что при вдавливании в смесь плунжера пенетрометра  $d = 2,5$  см на глубину 5 мм достигается получение статистически достоверных результатов величины сопротивления пенетрации во всем технологически допустимом диапазоне пластичности готовой к употреблению смеси.

Для оценки *формуемости* был разработан тест на нагружение образца смеси, готовой к употреблению. Метод предполагает следующие шаги. Смесь для 3D-печати заполняется цилиндрическая форма диаметром  $d_0 = 50$  мм и высотой  $h_0 = 50$  мм. Затем форму поднимают вверх. Сначала производится контроль вертикальных и горизонтальных деформаций образца. Если деформирования не происходит, то на верхнюю поверхность свежего образца помещается груз массой 2 кг и фиксируются вертикальные ( $h_i$ , мм) и горизонтальные ( $d_i$ , мм) деформации образца (рис. 7в). По результатам измерений рассчитываются следующие показатели:

- относительные продольные деформации слоя

$$\varepsilon_{\text{прод}} = \frac{\Delta_{\text{прод}}}{l_{\text{эт}}}, \quad (3)$$

где  $\Delta_{\text{прод}} = l_{\text{эт}} - l_{\text{сл}}$  – изменение высоты печатного слоя  $l_{\text{сл}}$  по отношению к высоте сопла экструдера (мм);

- относительные поперечные деформации слоя

$$\varepsilon_{\text{поп}} = \frac{\Delta_{\text{поп}}}{l_{\text{эт}}}, \quad (4)$$

где  $\Delta_{\text{поп}} = l_{\text{эт}} - l_{\text{сл}}$  – изменение высоты печатного слоя  $l_{\text{сл}}$  по отношению к ширине сопла экструдера(мм);

- коэффициент деформирования слоя, в зависимости от времени выдержки образца  $v_5$  – 5 минут,  $v_{10}$  – 10 минут,  $v_{20}$  – 20 минут.

$$v = \frac{\varepsilon_{\text{поп}}}{\varepsilon_{\text{прод}}}. \quad (5)$$

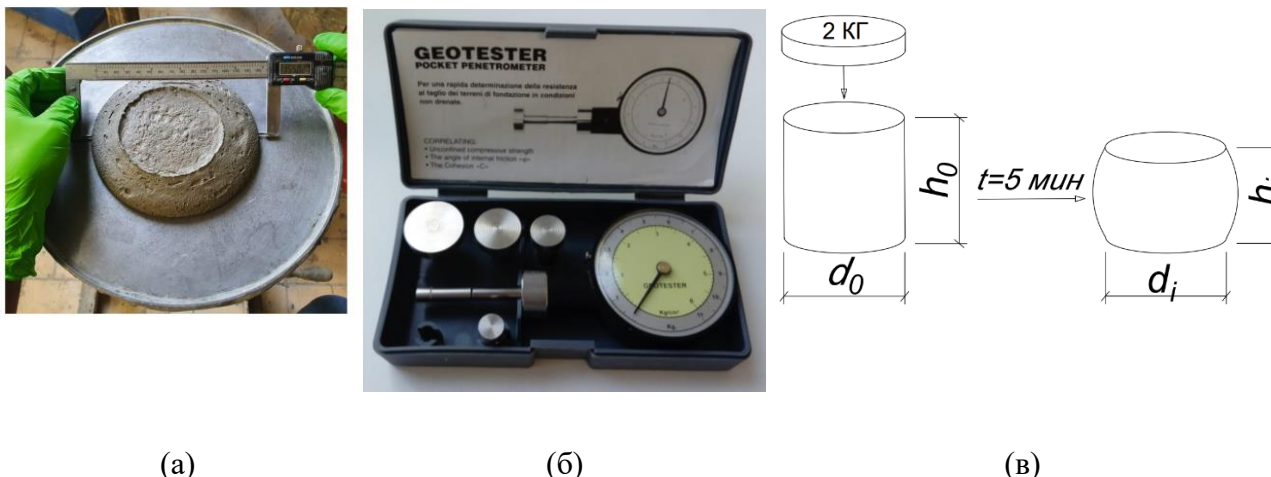


Рисунок 7 – Иллюстрация технических методов оценки технологических характеристик:

- а) – измерение диаметра распыва смеси после встряхивания;  
 б) пенетрометр универсальный Georocket S068; в) схема теста на формуемость

Верификация технических методов производилась методами сдвиговой реометрии.

На основании обобщения и систематизации всего комплекса полученных экспериментальных данных для всех пар оцениваемых технологических и реологических характеристик построены диаграммы корреляции, рассчитаны коэффициенты корреляции. Анализ полученных данных показал наличие корреляции между технологическими и реологическими характеристиками смесей (табл. 4).



Таблица 4 – Значения коэффициента корреляции между технологическими и реологическими характеристиками смесей

Наименование технологических характеристик	Наименование реологических характеристик			
	Оценка предела пластичности $K_i(I)$ ,	Структурная прочность $\sigma_0$ , кПа	Пластическая прочность $\sigma_{пл}$ , кПа	Относительные пластические деформации $\Delta_{пл}$ , мм/мм
Средний диаметр расплава $D_{ср}$	<b>-0,73</b>	-0,36	-0,51	-0,17
Сопrotивление пенетрации $R_{пл}$	<b>0,77</b>	0,27	0,23	-0,16
Коэффициент деформирования без пригружения $\nu_0$	-0,56	-0,21	0,46	<b>0,73</b>
Коэффициент деформирования при пригружении	$\nu_5$	-0,51	-0,11	<b>0,52</b>
	$\nu_{10}$	-0,52	-0,22	<b>0,82</b>
	$\nu_{20}$	-0,45	-0,07	<b>0,75</b>
	общий	-0,47	-0,14	<b>0,65</b>

На основании выполненной верификации предложенных технических методов и критериев оценки технологических характеристик их следует признать достоверными и адекватными требованиям технологии 3D-печати.

В четвертой главе представлены результаты исследований влияния технологических свойств смесей на качество 3D-печатных модельных и полноразмерных элементов. При проведении экспериментов осуществлялся контроль технологических характеристик смесей (табл. 5,6) физико-механические свойств слоистых образцов, выпиленных из всех видов исследованных элементов (табл. 7). Для каждого напечатанного элемента производилась оценка деформаций по вертикали и горизонтали с точностью 0,5 мм, фотофиксация дефектности слоев (рис. 8).

Таблица 5 – Текучесть и пластичность смесей для 3D-печати полноразмерных элементов

В/Ц	Расплав смеси (после экструдирования), мм		Сопrotивление пенетрации ( $R_{пл}$ ), кг/см <sup>2</sup>	
	Начало печати	Конец печати	Начало печати	Конец печати
0,44	150	165	0,8	1,7
0,45	205	165	0,4	1,2
0,46	220	187	<0,02	0,02

Таблица 6 – Формоустойчивость смесей для 3D-печати полноразмерных конструкций

В/Ц	Эталон (без нагрузки)		Коэффициент деформирования $\nu_3$	Нагружен 2кг через 5 мин		Коэффициент деформирования $\nu_5$	Нагружен 2кг через 10 мин		Коэффициент деформирования $\nu_{10}$	Нагружен 2кг через 20 мин		Коэффициент деформирования $\nu_{20}$
	$\epsilon_{прод}$ , %	$\epsilon_{поп}$ , %		$\epsilon_{прод}$ , %	$\epsilon_{поп}$ , %		$\epsilon_{прод}$ , %	$\epsilon_{поп}$ , %		$\epsilon_{прод}$ , %	$\epsilon_{поп}$ , %	
0,44	96	100	1,04	74	110	1,48	92	102	1,11	98	100	1,04
0,45	90	100	1,11	64	120	1,87	80	106	1,32	86	104	1,2

а)



б)



Рисунок 8 – Модельные (а) и полноразмерные элементы (б), полученные при печати смесями с оптимальными технологическими характеристиками

Для полученных экспериментальных данных установлены корреляционные зависимости для пар оцениваемых технологических характеристик смесей и прочностных показателей слоистых композитов. Наиболее высокие значения прочности на сжатие и сцепления слоев обеспечиваются в диапазоне значений сопротивления пенетрации  $R_{пл} = 0,25-0,35 \text{ кг/см}^2$ . Между диаметром расплыва смесей и прочностью при сжатии слоистых композитов имеется слабая обратная корреляция, при повышении диаметра расплыва смесей прочность снижается. Это закономерно связано с известным законом влияния В/Ц-отношения на прочность, в соответствии с которым с увеличением количества воды в системе прочность затвердевшего композита снижается вследствие повышения его пористости.

Таблица 7 – Прочность при сжатии слоистых образцов

Вид и ID смеси	Прочность (МПа) в возрасте 28 суток при значениях В/Ц:										
	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43
Мелкозернистая Ц-В-СП-МКЛ-П	47,5	48,1	50,1	47,0	44,2	39,0	–	–	–	–	–
Микрозернистая Ц-В-СП-МКЛ-ИМ	–	–	–	–	–	–	31,6	40,7	41,4	38,2	30,2

На основании комплексной оценки качества модельных и полноразмерных 3D-печатных элементов уточнен диапазон требований к перечню и значениям технологических характеристик смесей для 3D-печати:

- показатель текучести по диаметру расплыва смесей  $D_{ср} = 160-190 \text{ мм}$ ;
- показатель пластичности, сопротивление пенетрации  $R_{пл} = 0,2 - 1,6 \text{ кг/см}^2$ ;
- показатель формоустойчивости, коэффициент деформирования при нагружении образцов смеси через 10 минут после ее приготовления  $v_{10} \leq 1,3$ .

В зависимости от значения показателя текучести смеси для аддитивных строительных технологий 3D-печати предлагается разделить на марки в соответствии с таблицами 8 и 9. Использование смесей конкретных марок зависит от типа принтера, его системы подачи и экструзии.

Установлено, что при таких значениях технологических характеристик смесей обеспечивается устойчивость конструкции, слои отличаются структурой без трещин и крупных разрывов и дефектов, коэффициент деформирования нижнего слоя стены под давлением вышележащих слоев не превышает  $v = 1,2$ .

Таблица 8 – Марки высокотекучих смесей

Марка	Распływ смеси, мм	Сопротивление пенетрации ( $R_{пл}$ ), кг/см <sup>2</sup>
BT1	170	0,7
BT2	175	0,5
BT3	180	0,4
BT4	190	0,2

Таблица 9 – Марки низкотекучих смесей

Марка	Распływ смеси, мм	Сопротивление пенетрации ( $R_{пл}$ ), кг/см <sup>2</sup>	Коэффициент деформирования $v_{10}$
HT1	150	1,6	1,00
HT2	155	1,4	1,10
HT3	160	1,1	1,15
HT4	165	0,8	1,20

**В пятой главе** на основании полученных результатов экспериментальных исследований сформулированы требования к номенклатуре и рациональному диапазону значений технологических свойств смесей для строительной 3D-печати, разработаны положения методики лабораторного (производственного) и оперативного (для стройплощадки) контроля технологических характеристик смесей для аддитивных строительных технологий, изложены результаты апробации методик контроля технологических характеристик смесей в производственных условиях.

Апробация методик контроля технологических характеристик смесей произведена при печати опытных партий малых архитектурных форм на принтерах двух типов, отличающихся системами транспортировки и экструзии смесей («ARKON 1» и «AMT S-6044 LONG»). По результатам апробации установлено, что для обеспечения качественной печати в производственных условиях диапазон значений технологических характеристик смесей соответствует диапазону, определенному ранее в лабораторных условиях. Конкретные значения текучести, пластичности и формоустойчивости зависят от конструкции принтера.

Предложена процедура и алгоритм контроля качества смеси последовательно на всех стадиях 3D-печати. Внедрение данной процедуры в систему контроля качества процесса 3D-печати определит повышение ее эффективности за счет экономии временных ресурсов, снижения затрат на отделку поверхности, снижения потерь от брака.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Концепция исследований базируется на изучении реологического поведения цементных смесей для 3D-печати как вязко-пластичных дисперсных систем методами сдвиговой и сдвигающей реометрии. Изучение реологического поведения, строения структуры и свойств смесей использовано для обоснования критериев оценки реологических характеристик и диапазона их значений.

2. На основании изучения пластического поведения смесей методом сдвигающей реометрии с постоянной скоростью деформирования (метод N. Roussel'я) типизированы модели реологического поведения в условиях действия нормальных напряжений. С точки зрения устойчивости структуры выделены системы трех типов (непластичные, пластичные и текучие). Для обеспечения способности к экструзии уточнен диапазон значений критерия пластичности  $K_i(I) = 1,0-2,0$  кПа, при достижении которого в вязко-пластичной дисперсной системе происходит переход от устойчивого состояния к

началу разрушения коагуляционных контактов в структуре и вязкопластическому течению.

3. Для оценки формоустойчивости смесей предложен и апробирован метод реометрии при сдавливании с постоянной скоростью нагружения. Метод основан на моделировании реологического поведения вязко-пластичной смеси в условиях нарастания нагрузки при послойной укладке слоев. Адекватность метода доказана его верификацией путем сопоставления кривых пластического деформирования смесей при действии нормальных напряжений (при сдавливании) и полных реологических кривых, полученных методом сдвиговой реометрии.

4. Предложены реологические критерии оценки формоустойчивости смесей, рассматриваемые как оценочные характеристики пределов текучести в условиях действия нормальных напряжений (при сдавливании) в технологических условиях 3D-печати:

- структурная прочность  $\sigma_0$  (оценка статического предела текучести  $\tau_{K1}$ ) характеризует способность вязко-пластичной смеси воспринимать нагрузку без деформирования напечатанного слоя;

- пластическая прочность  $\sigma_{пл}$  (оценка бингамовского предела текучести  $\tau_{K2}$ ) характеризует способность вязко-пластичной смеси воспринимать нагрузку без нарушения сплошности слоя;

- относительная деформация слоя смеси до момента нарушения его сплошности  $\Delta_{пл}$ .

5. Для решения задач производственного контроля качества смесей в процессе 3D-печати предложены следующие критерии и методы оценки технологических характеристик смесей:

- показатель текучести по диаметру расплыва смесей, оцениваемый при помощи встряхивающего теста;

- показатель пластичности, оцениваемый по величине сопротивления пенетрации с использованием стандартного грунтового пенетromетра с диаметром плунжера 2,5 см;

- показатель формоустойчивости, оцениваемый коэффициентом деформирования образца смеси  $\upsilon$  при нагружении с использованием авторского метода.

Между всеми парами указанных технологических характеристик смесей, оцененных по предложенным методикам, коэффициент корреляции составляет 0,7 – 0,8.

6. На основании выполненной верификации предложенных методов и критериев оценки технологических характеристик смесей методами сдавливающей реометрии их следует признать адекватными реологическим моделям и подходам, так как коэффициенты корреляции между реологическими и технологическими характеристиками смесей составляют:

- 0,73 – между показателем расплыва смесей  $D_{cp}$  и оценкой предела пластичности  $K_i(I)$ ;

- 0,77 – между сопротивлением пенетрации  $P_{пл}$  и оценкой предела пластичности  $K_i(I)$ ,

- 0,77 - 0,82 – между коэффициентом деформации образцов смесей  $\upsilon$  и относительными пластическими деформациями  $\Delta_{пл}$ ,

- 0,65 - 0,82 – между коэффициентом деформации образцов смесей  $\upsilon$  и пластической прочностью  $\sigma_{пл}$ .

7. Комплексная оценка качества 3D-печатных конструкций позволила установить рациональные диапазоны технологических характеристик смесей, необходимые для обеспечения качественной печати:

- текучесть по диаметру расплыва в диапазоне  $D_{cp} = 160-190$  мм;

- пластичность по сопротивлению пенетрации, требования к диапазону значений пластичности определяются типом принтера и составляют  $R_{пл} = 0,2 - 0,7 \text{ кг/см}^2$  для высокотекучих смесей,  $R_{пл} = 0,8 - 1,6 \text{ кг/см}^2$  для низкотекучих смесей;

- формоустойчивость по коэффициенту деформирования при нагружении образцов смеси через 10 минут после ее приготовления  $v_{10} = 1,0 - 1,2$ .

8. По результатам выполненной работы разработаны предложения к нормативным техническим документам в части развития системы стандартизации материалов для аддитивного строительного производства и методов их испытаний. Разработаны предложения по классификации, требованиям к маркам, значениям и методам технического контроля технологических показателей текучести, пластичности и формоустойчивости смесей для 3D-печати, готовых к употреблению.

9. По результатам апробации методик контроля технологических характеристик смесей в производственных условиях установлено, что диапазон значений технологических характеристик смесей для обеспечения качественной 3D-печати совпадает для лабораторных и производственных условий при использовании принтеров разного размера и конструкции. Конкретные значения текучести, пластичности и формоустойчивости зависят от конструкции принтера. Предложена процедура и алгоритм контроля качества смеси последовательно на всех стадиях 3D-печати. Внедрение данной процедуры в систему контроля качества процесса 3D-печати определит повышение ее эффективности за счет экономии временных ресурсов, снижения затрат на отделку поверхности, снижения потерь от брака.

#### **Рекомендации по использованию результатов работы.**

Предложения по требованиям к технологическим характеристикам смеси и методам их контроля рекомендованы для разработки новых ГОСТ Р «Строительные смеси и композиты для аддитивного производства. Классификация и общие технические требования», ГОСТ Р «Строительные смеси и композиты для аддитивного производства. Методы испытаний» в рамках Договора № 32312234196 – 1/2023 с Федеральным центром нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве («ФАУ ФЦС»). Данные предложения также рекомендуются к использованию при организации контроля качества при производстве смесей в заводских условиях и строительного процесса методом 3D-печати.

**Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с разработкой требований к показателям работоспособности смесей для аддитивных технологий (3D-печати), таких как требования к срокам начала и окончания схватывания смесей, времени сохранения их первоначальных технологических свойств, а также с обоснованием и регламентацией конкретных методов испытаний данных показателей.**

#### **Список основных работ, опубликованных по теме диссертации**

##### **Публикации в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. Славчева, Г. С. Анализ и критериальная оценка реологического поведения смесей для строительной 3D-печати / Г. С. Славчева, М. А. Шведова, Д. С. Бабенко // Строительные материалы. – 2018. – № 12. – С. 34-40. – DOI 10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40. – EDN YROONV.

2. Славчева Г.С. Регулирование вязкопластических свойств цементных смесей для строительной 3D-печати / Г. С. Славчева, О. В. Артамонова, Д. С. Бабенко, М. А. Шведова // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2022. – № 3(52). – С. 64-80. – DOI 10.24866/2227-6858/2022-3/64-80. – EDN YAMUOZ.

3. Славчева Г.С. Особенности структурообразования, схватывания и твердения микрозернистых цементных смесей для строительной 3D-печати / Г.С. Славчева, О.В. Артамонова, М.А. Шведова, **Д.С. Бабенко** // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2022. – № 6(762). – С. 30-45.

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

4. Slavcheva G.S. Effect of Limestone Filler Dosage and Granulometry on the 3D printable Mixture Rheology / G. S. Slavcheva, O. V. Artamonova, **D. S. Babenko**, A. I. Ibryaeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures, Ekaterinburg, 21–22.05.2019 / Ural Federal University. Vol. 972. – Ekaterinburg: IOP, 2020. – P. 012042. – DOI 10.1088/1757-899X/972/1/012042. – EDN XNSSXN.

5. Славчева Г.С. Исследование влияния модифицирующих добавок на структурообразование и твердение цементных композитов для 3d-печати / Г.С. Славчева, О.В. Артамонова, **Д.С. Бабенко** // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2023. – Т. 25. – № 1. – С. 112 – 124.

**Статьи и материалы конференций**

6. **Бабенко, Д. С.** Обоснование требований к номенклатуре и значениям технологических свойств смесей для аддитивных строительных технологий / Международная конференция по физике материалов, строительным конструкциям и технологиям в строительстве, промышленной и производственной инженерии (МРСРЕ-2024): Сборник трудов V международной научно-технической конференции, Владимир, 23–25 апреля 2024 года. – Владимир: АРКАИМ, 2024. – С. 22-30.

7. Славчева, Г. С. Модели реологического поведения смесей в процессе строительной 3D-печати / Г. С. Славчева, **Д. С. Бабенко** // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (APCSCE 2018): программа и тезисы докладов, Новосибирск, 01–08 июля 2018 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 2018. – С. 92.

8. Экспериментальные исследования пластичности и формоустойчивостицементных смесей на кварцевом песке для строительной 3D-печати / Г. С. Славчева, О. В. Артамонова, М. А. Шведова, **Д. С. Бабенко** // Химия, физика и механика материалов. – 2022. – № 4(35). – С. 37-52. – EDN BSOIFG.

9. Славчева, Г. С. Экспериментальные исследования пластичности и формоустойчивости, модифицированных цементных смесей на известняковой муке для строительной 3D-печати / Г. С. Славчева, О. В. Артамонова, М. А. Шведова, **Д. С. Бабенко** // Химия, физика и механика материалов. – 2022. – № 3(34). – С. 75-92.

10. Бритвина, Е. А. Строительная 3D-печать в дизайне городской среды / Е. А. Бритвина, М. А. Шведова, **Д. С. Бабенко** // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: Материалы VI Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 19–21 апреля 2023 года / Под общей редакцией А. А. Семенова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 142-148. – DOI 10.23968/BIMAC.2023.020.

**Патенты РФ:**

11. Пат. 2729283 Российская Федерация, СПК, С04В 28/04; Двухфазная смесь на основе цемента для композитов в технологии строительной 3D-печати / Славчева Г.С., Артамонова О. В., Бритвина Е.А., **Бабенко Д.С.**, Ибряева А. И.; заявитель и патентообладатель ВГТУ. – № 2019133428; заявл. 21.10.2019; опубл. 05.08.2020. – 8 с.

12. Пат. 2729085 Российская Федерация, СПК С04В 28/04; Двухфазная смесь на основе цемента для композитов в технологии строительной 3D-печати / Славчева Г.С., Артамонова О.В., Бритвина Е.А., **Бабенко Д.С.**, Ибряева А.И.; заявитель и патентообладатель ВГТУ. – № 2019133426; заявл. 21.10.2019; опубл. 04.08.2020. – 8 с

13. Пат. 2762841 Российская Федерация, СПК, С04В 28/04 (2021.08); С04В 14/06 (2021.08); В33У 70/00. Смесь для получения декоративного композита заданной колористики в технологии строительной 3D-печати и способ её получения / Славчева Г.С., Резанов А.А., Шведова М.А., Бритвина Е.А., **Бабенко Д.С.**; заявитель и патентообладатель ВГТУ. – № 2020138015; заявл. 19.11.2020; опубл. 23.12.2021. – 11 с.

14. Пат. 2771801 Российская Федерация, СПК, С04В 28/04 (2021.08); С04В 24/38 (2021.08); С04В 2111/20 (2021.08); С04В 14/06 (2021.08); В33У 70/00. Двухфазная смесь на основе белого цемента для получения декоративного композита в технологии строительной 3D-печати / Славчева Г.С., Бритвина Е.А., Шведова М.А., Полосина А.А., **Бабенко Д.С.**, Андрияшкина А.С.; заявитель и патентообладатель ВГТУ. – № 2021114993; заявл. 25.05.2021; опубл. 12.05.2021. – 9 с.

15. Пат. 2767805 Российская Федерация, СПК, С04В 28/04 (2022.01); С04В 24/00 (2022.01); С04В 14/06 (2022.01); В33У 70/00 Двухфазная смесь на основе белого цемента для получения декоративного композита в технологии строительной 3D-печати / Славчева Г.С., Бритвина Е.А., Шведова М.А., Полосина А. А., **Бабенко Д.С.**, Андрияшкина А.С.; заявитель и патентообладатель ВГТУ. – № 2021114995; заявл. 25.05.2021; опубл. 22.03.2022. – 8 с.

16. Пат. 2767643 Российская Федерация, СПК, С04В 28/04 (2021.08); С04В 14/02 (2021.08); С04В 24/26 (2021.08); С04В 16/00 (2021.08); С04В 2111/20. Наномодифицированный цементный композит для строительной 3D-печати / Артамонова О.В., Славчева Г.С., Шведова М.А., Бритвина Е.А., **Бабенко Д.С.**; заявитель и патентообладатель ВГТУ. – № 2021124876; заявл. 20.08.2021; опубл. 18.03.2022. – 9 с.

17. Пат. 2767641 Российская Федерация, СПК, С04В 28/04 (2021.08); С04В 14/02 (2021.08); С04В 14/26 (2021.08); С04В 24/26 (2021.08); С04В 16/06 (2021.08); С04В 2111/20 (2021.08) Декоративный бетон повышенной физико-климатической стойкости для строительной 3D-печати / Славчева Г.С., Шведова М.А., Бритвина Е.А., **Бабенко Д.С.**; заявитель и патентообладатель ВГТУ. – № 2021124875; заявл. 20.08.2021; опубл. 18.03.2022. – 10 с.

#### **Свидетельство на «ноу-хау»**

18. Свидетельство на секрет производства (ноу-хау) № 2023004 Методика и устройство для оценки пластичности цементных смесей / Славчева Г.С., **Бабенко Д.С.**, Юров П.Ю., правообладатель ВГТУ, приказ №01-1-08/871 от 29.12.2023; опубл. 29.12.2023.

Подписано в печать 16.10.24 г. Формат 60x84 1/16.

Бумага писчая. Усл. п. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 254

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ

394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84